

1-1-2004

Evaluación del impacto de lámparas fluorescentes con balastos electrónicos en la calidad de potencia

Rodrigo Esteban Puentes Iregui
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electronica

Citación recomendada

Puentes Iregui, R. E. (2004). Evaluación del impacto de lámparas fluorescentes con balastos electrónicos en la calidad de potencia. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electronica/541

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

***EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LÁMPARAS FLUORESCENTES CON
BALASTOS ELECTRÓNICOS EN LA CALIDAD DE POTENCIA.***

RODRIGO ESTEBAN PUENTES IREGUI



**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2004.**

***EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LÁMPARAS FLUORESCENTES CON
BALASTOS ELECTRÓNICOS EN LA CALIDAD DE POTENCIA.***

RODRIGO ESTEBAN PUENTES IREGUI

***Monografía para optar al
Título de Ingeniero Electricista***

**Director
Ing. Luis Hernando Correa**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2004.**

Nota de aceptación

Ing. Luis Hernando Correa
Director del proyecto

Ing. Ramón Antolinez (Jurado)

Ing. Fernando Rodríguez (Jurado)

Bogotá D.C. 2004

Ni la Universidad, ni el asesor, ni el jurado

Calificador son responsables de las ideas

Aquí expuestas.

DEDICATORIA

Este trabajo es el paso final para llegar a una meta trazada desde el día en que comencé mis estudios desde muy pequeño. A quien más puede ir dedicado este trabajo de grado sino es a Dios y a mis Padres que día a día me apoyaron para lograr la meta de ser profesional y que con su esfuerzo, dedicación y constante aliento me impulsaron hasta alcanzarla.

Al resto de mis familiares hermano, tíos, tías, primos, primas y abuelos que siempre estuvieron pendientes de mis estudios. A las diferentes personas que directa o indirectamente me apoyaron para lograrla y no están mencionadas. A todos los anteriores no me que más que darles un profundo agradecimiento y decirles que este triunfo es de todos.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

- ING. LUIS HERNANDO CORREA. Ingeniero electricista, catedrático de la Universidad de la Salle.
- DR. GERMÁN DARIO HERNÁNDEZ. Jefe del Departamento de Servicios Generales, Universidad de la Salle.
- ING. OSCAR FLORES. Ingeniero electricista, Laboratorio de la Universidad de la Salle.
- SR. GULLIERMO CHANTRE. Técnico electricista, Universidad de la Salle.
- SR. CIRO RODRIGUEZ. Técnico electricista, Universidad de la Salle.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. GENERALIDADES	4
1.1 CALIDAD DE POTENCIA	4
1.2 BAJA CALIDAD DE POTENCIA	4
1.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES	5
1.3.1 Impulsos	5
1.3.2 Spikes	5
1.3.3 Ruido	5
1.3.4 Transientes	5
1.3.5 Interrupciones	6
1.3.6 Sags	6
1.3.7 Swells	6
1.3.8 Titileo o Flicker	6
1.3.9 Armónicos	6
1.4 ARMONICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION	7
1.5 DISTORSION ARMONICA	8
1.6 FACTOR ARMONICO	9
1.7 DISTORSION ARMONICA TOTAL	10
1.8 FACTOR DE DISTORSION DE DEMANDA	10
1.9 FACTOR DE DISTORSION	10
1.10 FACTOR DE BALASTO	12
1.11 FACTOR DE POTENCIA DE BALASTO	12
1.12 FUENTES DE LOS ARMONICOS	13
1.12.1 Fuentes de corrientes armónicas	13
1.12.2 Fuentes de voltajes armónicos	13
1.12.3 Efectos de los armónicos en diferentes equipos eléctricos	13
1.12.3.1 Transformadores	13
1.12.3.2 Condensadores	13
1.12.3.3 Conductores	14
1.12.3.4 Equipos de medida, protección, control y comunicaciones	14
1.12.3.5 Iluminación	14

1.12.3.6	Motores	14
1.12.3.7	Distribución	14
1.13	LA NORMA IEEE 519	14
1.13.1	Límites de distorsión de corriente	15
1.13.2	Límites de distorsión de voltaje	16
1.14	NORMA IEC	16
1.14.1	Clasificación de los equipos	16
1.14.2	Límites para los equipos clase A	17
1.14.3	Límites para equipos clase B	17
1.14.4	Límites para equipos clase C	17
1.14.5	Límites para equipos clase D	18
1.15	FILTROS DE ARMONICOS	19
1.15.1	Condensadores con aislamiento reforzado	20
1.15.2	Filtros de eliminación de armónicos	20
2.	LAMPARAS FLUORESCENTES	21
2.1	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES	21
2.2	PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LA LÁMPARA FLUORESCENTE	23
2.2.1	Tensión de alimentación	23
2.2.2	Frecuencia	23
2.2.3	Temperatura de funcionamiento	23
2.3	TIPOS DE BALASTOS PARA LAMPARAS FLUORESCENTES	23
2.3.1	Balasto para lámparas fluorescentes de Precalentamiento	24
2.3.2	Balasto para lámparas fluorescentes de Encendido Rápido	24
2.3.3	Balasto para lámparas fluorescentes de Encendido Instantáneo	26
2.4	EL BALASTO ELECTROMAGNETICO	27
2.5	DESVENTAJAS DE LOS BALASTOS ELECTROMAGNETICOS	27
2.5.1	Pérdidas	27
2.5.2	Parpadeo	27
2.5.3	Inestabilidad	27
2.5.4	Temperatura	28
2.5.5	Ruido	28
2.6	BALASTO ELECTRONICO	28

2.7	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL BALASTO ELECTRÓNICO	28
2.8	LAMPARA COMPACTA CON BALASTO ELECTRONICO INTEGRADO	30
2.9	BENEFICIOS DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS	31
2.9.1	Sustancial ahorro de energía	31
2.9.2	Vida útil más larga	31
2.9.3	Excelente reproducción cromática	31
2.9.4	Tamaño compacto	32
2.9.5	Encendido sin parpadeo	32
2.9.6	Beneficio del medio ambiente	32
3.	ADQUISICION DE DATOS EN LA UNIVERSIDAD	33
3.1	SELECCIÓN DE LOS TABLEROS	33
3.2	METODOLOGIA SEGUIDA	34
3.3	EQUIPO DE MEDICION UTILIZADO	34
4.	ANALISIS DE LOS DATOS REGISTRADOS	36
4.1	CAFETERIA	36
4.1.1	Comportamiento de la corriente	37
4.1.2	Comportamiento de la tensión	37
4.1.3	Comportamiento del factor de potencia	38
4.1.4	Comportamiento de la frecuencia	38
4.1.5	Comportamiento de la potencia activa	39
4.1.6	Comportamiento de la distorsión armónica total	39
4.1.7	Caracterización del contenido armónico individual	42
4.2	SALA DE EXPOSICION	44
4.2.1	Comportamiento de la corriente	44
4.2.2	Comportamiento de la tensión	44
4.2.3	Comportamiento del factor de potencia	45
4.2.4	Comportamiento de la frecuencia	45
4.2.5	Comportamiento de la potencia activa	46
4.2.6	Comportamiento de la distorsión armónica total	47
4.2.7	Caracterización del contenido armónico individual	48
4.3	TABLERO TA7	50
4.3.1	Comportamiento de la corriente	50
4.3.2	Comportamiento de la tensión	51
4.3.3	Comportamiento del factor de potencia	51

4.3.4	Comportamiento de la frecuencia	52
4.3.5	Comportamiento de la potencia activa	52
4.3.6	Comportamiento de la distorsión armónica total	53
4.3.7	Caracterización del contenido armónico individual	54
4.4	TABLERO TD6	55
4.4.1	Comportamiento de la corriente	55
4.4.2	Comportamiento de la tensión	56
4.4.3	Comportamiento del factor de potencia	56
4.4.4	Comportamiento de la frecuencia	57
4.4.5	Comportamiento de la potencia activa	58
4.4.6	Comportamiento de la distorsión armónica total	58
4.4.7	Caracterización del contenido armónico individual	58
4.5	TABLERO TF4	61
4.5.1	Comportamiento de la corriente	61
4.5.2	Comportamiento de la tensión	61
4.5.3	Comportamiento del factor de potencia	61
4.5.4	Comportamiento de la frecuencia	62
4.5.5	Comportamiento de la potencia activa	62
4.5.6	Comportamiento de la distorsión armónica total	64
4.5.7	Caracterización del contenido armónico individual	65
4.6	ACOMETIDA PRINCIPAL	66
4.6.1	Comportamiento de la corriente	66
4.6.2	Comportamiento de la tensión	66
4.6.3	Comportamiento del factor de potencia	67
4.6.4	Comportamiento de la frecuencia	67
4.6.5	Comportamiento de la potencia activa	68
4.6.6	Comportamiento de la distorsión armónica total	69
4.6.7	Caracterización del contenido armónico individual	73
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
5.1	CONCLUSIONES	74
5.2	RECOMENDACIONES	77
	BIBLIOGRAFIA	
	ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Bases para límites de corrientes armónicas	14
Tabla 2. Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución generales (<69 kV)	15
Tabla 3. Límites de distorsión de voltaje	15
Tabla 4. Límites para equipos clase A	17
Tabla 5. Límites para equipos clase B	18
Tabla 6. Límites para equipos clase C	18
Tabla 7. Límites para equipos clase D	19
Tabla 8. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero de la cafetería	41
Tabla 9. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero de la cafetería	41
Tabla 10. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero de la cafetería	43
Tabla 11. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero de la cafetería	44
Tabla 12. Análisis individual de corriente para la fase 3 en el tablero de la cafetería	44
Tabla 13. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero de la sala de exposición	49
Tabla 14. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero de la sala de exposición	49
Tabla 15. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero de la sala de exposición	49
Tabla 16. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero de la sala de exposición	49
Tabla 17. Análisis individual de corriente para la fase 3 en el tablero de la sala de exposición	50
Tabla 18. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero TA7	54
Tabla 19. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero TA7	54
Tabla 20. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero TA7	55
Tabla 21. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero TA7	55
Tabla 22. Análisis individual de corriente para la fase 3 en el tablero TA7	55

Tabla 23. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero TD6	58
Tabla 24. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero TD6	60
Tabla 25. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero TD6	60
Tabla 26. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero TD6	61
Tabla 27. Análisis individual de corriente para la fase 3 en el tablero TD6	61
Tabla 28. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero TF4	65
Tabla 29. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero TF4	65
Tabla 30. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero TF4	66
Tabla 31. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero TF4	66
Tabla 32. Análisis del THD de tensión por línea en la acometida principal	71
Tabla 33. Análisis del THD de corriente por línea en la acometida principal	71
Tabla 34. Análisis del TDD de corriente por línea en la acometida principal	71
Tabla 35. Caracterización armónica individual por fase	73

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Forma de onda ocasionada por una distorsión armónica	7
Figura 2. Forma de onda de corriente no sinusoidal	11
Figura 3. Conexión de una lámpara fluorescente de precalentamiento	25
Figura 4. Conexión de una lámpara fluorescente de encendido rápido	25
Figura 5. Diagrama de conexión de una lámpara fluorescente de encendido instantáneo	26
Figura 6. Diagrama básico de bloques de un balasto electrónico	29
Figura 7. Analizador de redes Circutor AR5	35

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curvas de carga por fase en el tablero de la cafetería	37
Gráfica 2. Curva de tensión por fase en el tablero de la cafetería	38
Gráfica 3. Curva del factor de potencia en el tablero de la cafetería	39
Gráfica 4. Curva de la frecuencia en el tablero de la cafetería	39
Gráfica 5. Curva de la potencia activa en el tablero de la cafetería	40
Gráfica 6. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero de la cafetería	41
Gráfica 7. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero de la cafetería	42
Gráfica 8. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en el tablero de la cafetería	42
Gráfica 9. Curvas de carga por fase en el tablero de la sala de exposición	45
Gráfica 10. Curva de tensión por fase en el tablero de la sala de exposición	45
Gráfica 11. Curva del factor de potencia en el tablero de la sala de exposición	46
Gráfica 12. Curva de la frecuencia en el tablero de la sala de exposición	46
Gráfica 13. Curva de la potencia activa en el tablero de la sala de exposición	47
Gráfica 14. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero de la sala de exposición	47
Gráfica 15. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero de la sala de exposición	48
Gráfica 16. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en el tablero de la sala de exposición	48
Gráfica 17. Curvas de carga por fase en el tablero TA7	50
Gráfica 18. Curvas de tensión por fase en el tablero TA7	51
Gráfica 19. Curva del factor de potencia en el tablero TA7	51
Gráfica 20. Curva de la frecuencia en el tablero TA7	52
Gráfica 21. Curva de la potencia activa en el tablero TA7	52
Gráfica 22. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero TA7	53

Gráfica 23. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero TA7	53
Gráfica 24. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en el tablero TA7	54
Gráfica 25. Curvas de carga por fase en el tablero TD6	56
Gráfica 26. Curva de tensión por fase en el tablero TD6	56
Gráfica 27. Curva del factor de potencia en el tablero TD6	57
Gráfica 28. Curva de la frecuencia en el tablero TD6	57
Gráfica 29. Curva de la potencia activa en el tablero TD6	58
Gráfica 30. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero TD6	59
Gráfica 31. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero TD6	59
Gráfica 32. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en el tablero TD6	60
Gráfica 33. Curvas de carga por fase en el tablero TF4	62
Gráfica 34. Curva de tensión por fase en el tablero TF4	62
Gráfica 35. Curva del factor de potencia en el tablero TF4	63
Gráfica 36. Curva de la frecuencia en el tablero TF4	63
Gráfica 37. Curva de la potencia activa en el tablero TF4	64
Gráfica 38. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero TF4	64
Gráfica 39. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero TF4	65
Gráfica 40. Curvas de carga por fase en la acometida principal	67
Gráfica 41. Curvas de tensión por fase en la acometida principal	67
Gráfica 42. Curva del factor de potencia en la acometida principal	68
Gráfica 43. Curva de la frecuencia en la acometida principal	68
Gráfica 44. Curva de la potencia activa en la acometida principal	69
Gráfica 45. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en la acometida principal	69
Gráfica 46. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en la acometida principal	70
Gráfica 47. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en la acometida principal	70
Gráfica 48. Comportamiento del TDD para la fase 1 en la acometida principal	72

Gráfica 49. Comportamiento del TDD para la fase 2 en la acometida principal	72
Gráfica 50. Comportamiento del TDD para la fase 3 en la acometida principal	72

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Diagrama unifilar sede centro	80
Anexo B. Formato de visitas a tableros	81
Anexo C. Cronograma de mediciones	88
Anexo D. Catálogo del equipo de medida Circutor AR5	89
Anexo E. Cuadro de resumen comparativo	137

DEDICATORIA

Este trabajo es el paso final para llegar a una meta trazada desde el día en que comencé mis estudios desde muy pequeño. A quien más puede ir dedicado este trabajo de grado sino es a Dios y a mis Padres que día a día me apoyaron para lograr la meta de ser profesional y que con su esfuerzo, dedicación y constante aliento me impulsaron hasta alcanzarla.

Al resto de mis familiares hermano, tíos, tías, primos, primas y abuelos que siempre estuvieron pendientes de mis estudios. A las diferentes personas que directa o indirectamente me apoyaron para lograrla y no están mencionadas. A todos los anteriores no me que más que darles un profundo agradecimiento y decirles que este triunfo es de todos.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

- ING. LUIS HERNANDO CORREA. Ingeniero electricista, catedrático de la Universidad de la Salle.
- DR. GERMÁN DARIO HERNÁNDEZ. Jefe del Departamento de Servicios Generales, Universidad de la Salle.
- ING. OSCAR FLORES. Ingeniero electricista, Laboratorio de la Universidad de la Salle.
- SR. GULLIERMO CHANTRE. Técnico electricista, Universidad de la Salle.
- SR. CIRO RODRIGUEZ. Técnico electricista, Universidad de la Salle.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. GENERALIDADES	4
1.1 CALIDAD DE POTENCIA	4
1.2 BAJA CALIDAD DE POTENCIA	4
1.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES	5
1.3.1 Impulsos	5
1.3.2 Spikes	5
1.3.3 Ruido	5
1.3.4 Transientes	5
1.3.5 Interrupciones	6
1.3.6 Sags	6
1.3.7 Swells	6
1.3.8 Titileo o Flicker	6
1.3.9 Armónicos	6
1.4 ARMONICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION	7
1.5 DISTORSION ARMONICA	8
1.6 FACTOR ARMONICO	9
1.7 DISTORSION ARMONICA TOTAL	10
1.8 FACTOR DE DISTORSION DE DEMANDA	10
1.9 FACTOR DE DISTORSION	10
1.10 FACTOR DE BALASTO	12
1.11 FACTOR DE POTENCIA DE BALASTO	12
1.12 FUENTES DE LOS ARMONICOS	13
1.12.1 Fuentes de corrientes armónicas	13
1.12.2 Fuentes de voltajes armónicos	13
1.12.3 Efectos de los armónicos en diferentes equipos eléctricos	13
1.12.3.1 Transformadores	13
1.12.3.2 Condensadores	13
1.12.3.3 Conductores	14
1.12.3.4 Equipos de medida, protección, control y comunicaciones	14
1.12.3.5 Iluminación	14

1.12.3.6	Motores	14
1.12.3.7	Distribución	14
1.13	LA NORMA IEEE 519	14
1.13.1	Límites de distorsión de corriente	15
1.13.2	Límites de distorsión de voltaje	16
1.14	NORMA IEC	16
1.14.1	Clasificación de los equipos	16
1.14.2	Límites para los equipos clase A	17
1.14.3	Límites para equipos clase B	17
1.14.4	Límites para equipos clase C	17
1.14.5	Límites para equipos clase D	18
1.15	FILTROS DE ARMONICOS	19
1.15.1	Condensadores con aislamiento reforzado	20
1.15.2	Filtros de eliminación de armónicos	20
2.	LAMPARAS FLUORESCENTES	21
2.1	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES	21
2.2	PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LA LÁMPARA FLUORESCENTE	23
2.2.1	Tensión de alimentación	23
2.2.2	Frecuencia	23
2.2.3	Temperatura de funcionamiento	23
2.3	TIPOS DE BALASTOS PARA LAMPARAS FLUORESCENTES	23
2.3.1	Balasto para lámparas fluorescentes de Precalentamiento	24
2.3.2	Balasto para lámparas fluorescentes de Encendido Rápido	24
2.3.3	Balasto para lámparas fluorescentes de Encendido Instantáneo	26
2.4	EL BALASTO ELECTROMAGNETICO	27
2.5	DESVENTAJAS DE LOS BALASTOS ELECTROMAGNETICOS	27
2.5.1	Pérdidas	27
2.5.2	Parpadeo	27
2.5.3	Inestabilidad	27
2.5.4	Temperatura	28
2.5.5	Ruido	28
2.6	BALASTO ELECTRONICO	28

2.7	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL BALASTO ELECTRÓNICO	28
2.8	LAMPARA COMPACTA CON BALASTO ELECTRONICO INTEGRADO	30
2.9	BENEFICIOS DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS	31
2.9.1	Sustancial ahorro de energía	31
2.9.2	Vida útil más larga	31
2.9.3	Excelente reproducción cromática	31
2.9.4	Tamaño compacto	32
2.9.5	Encendido sin parpadeo	32
2.9.6	Beneficio del medio ambiente	32
3.	ADQUISICION DE DATOS EN LA UNIVERSIDAD	33
3.1	SELECCIÓN DE LOS TABLEROS	33
3.2	METODOLOGIA SEGUIDA	34
3.3	EQUIPO DE MEDICION UTILIZADO	34
4.	ANALISIS DE LOS DATOS REGISTRADOS	36
4.1	CAFETERIA	36
4.1.1	Comportamiento de la corriente	37
4.1.2	Comportamiento de la tensión	37
4.1.3	Comportamiento del factor de potencia	38
4.1.4	Comportamiento de la frecuencia	38
4.1.5	Comportamiento de la potencia activa	39
4.1.6	Comportamiento de la distorsión armónica total	39
4.1.7	Caracterización del contenido armónico individual	42
4.2	SALA DE EXPOSICION	44
4.2.1	Comportamiento de la corriente	44
4.2.2	Comportamiento de la tensión	44
4.2.3	Comportamiento del factor de potencia	45
4.2.4	Comportamiento de la frecuencia	45
4.2.5	Comportamiento de la potencia activa	46
4.2.6	Comportamiento de la distorsión armónica total	47
4.2.7	Caracterización del contenido armónico individual	48
4.3	TABLERO TA7	50
4.3.1	Comportamiento de la corriente	50
4.3.2	Comportamiento de la tensión	51
4.3.3	Comportamiento del factor de potencia	51

4.3.4	Comportamiento de la frecuencia	52
4.3.5	Comportamiento de la potencia activa	52
4.3.6	Comportamiento de la distorsión armónica total	53
4.3.7	Caracterización del contenido armónico individual	54
4.4	TABLERO TD6	55
4.4.1	Comportamiento de la corriente	55
4.4.2	Comportamiento de la tensión	56
4.4.3	Comportamiento del factor de potencia	56
4.4.4	Comportamiento de la frecuencia	57
4.4.5	Comportamiento de la potencia activa	58
4.4.6	Comportamiento de la distorsión armónica total	58
4.4.7	Caracterización del contenido armónico individual	58
4.5	TABLERO TF4	61
4.5.1	Comportamiento de la corriente	61
4.5.2	Comportamiento de la tensión	61
4.5.3	Comportamiento del factor de potencia	61
4.5.4	Comportamiento de la frecuencia	62
4.5.5	Comportamiento de la potencia activa	62
4.5.6	Comportamiento de la distorsión armónica total	64
4.5.7	Caracterización del contenido armónico individual	65
4.6	ACOMETIDA PRINCIPAL	66
4.6.1	Comportamiento de la corriente	66
4.6.2	Comportamiento de la tensión	66
4.6.3	Comportamiento del factor de potencia	67
4.6.4	Comportamiento de la frecuencia	67
4.6.5	Comportamiento de la potencia activa	68
4.6.6	Comportamiento de la distorsión armónica total	69
4.6.7	Caracterización del contenido armónico individual	73
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
5.1	CONCLUSIONES	74
5.2	RECOMENDACIONES	77
	BIBLIOGRAFIA	
	ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Bases para límites de corrientes armónicas	14
Tabla 2. Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución generales (<69 kV)	15
Tabla 3. Límites de distorsión de voltaje	15
Tabla 4. Límites para equipos clase A	17
Tabla 5. Límites para equipos clase B	18
Tabla 6. Límites para equipos clase C	18
Tabla 7. Límites para equipos clase D	19
Tabla 8. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero de la cafetería	41
Tabla 9. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero de la cafetería	41
Tabla 10. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero de la cafetería	43
Tabla 11. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero de la cafetería	44
Tabla 12. Análisis individual de corriente para la fase 3 en el tablero de la cafetería	44
Tabla 13. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero de la sala de exposición	49
Tabla 14. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero de la sala de exposición	49
Tabla 15. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero de la sala de exposición	49
Tabla 16. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero de la sala de exposición	49
Tabla 17. Análisis individual de corriente para la fase 3 en el tablero de la sala de exposición	50
Tabla 18. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero TA7	54
Tabla 19. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero TA7	54
Tabla 20. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero TA7	55
Tabla 21. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero TA7	55
Tabla 22. Análisis individual de corriente para la fase 3 en el tablero TA7	55

Tabla 23. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero TD6	58
Tabla 24. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero TD6	60
Tabla 25. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero TD6	60
Tabla 26. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero TD6	61
Tabla 27. Análisis individual de corriente para la fase 3 en el tablero TD6	61
Tabla 28. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero TF4	65
Tabla 29. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero TF4	65
Tabla 30. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero TF4	66
Tabla 31. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero TF4	66
Tabla 32. Análisis del THD de tensión por línea en la acometida principal	71
Tabla 33. Análisis del THD de corriente por línea en la acometida principal	71
Tabla 34. Análisis del TDD de corriente por línea en la acometida principal	71
Tabla 35. Caracterización armónica individual por fase	73

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Forma de onda ocasionada por una distorsión armónica	7
Figura 2. Forma de onda de corriente no sinusoidal	11
Figura 3. Conexión de una lámpara fluorescente de precalentamiento	25
Figura 4. Conexión de una lámpara fluorescente de encendido rápido	25
Figura 5. Diagrama de conexión de una lámpara fluorescente de encendido instantáneo	26
Figura 6. Diagrama básico de bloques de un balasto electrónico	29
Figura 7. Analizador de redes Circutor AR5	35

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curvas de carga por fase en el tablero de la cafetería	37
Gráfica 2. Curva de tensión por fase en el tablero de la cafetería	38
Gráfica 3. Curva del factor de potencia en el tablero de la cafetería	39
Gráfica 4. Curva de la frecuencia en el tablero de la cafetería	39
Gráfica 5. Curva de la potencia activa en el tablero de la cafetería	40
Gráfica 6. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero de la cafetería	41
Gráfica 7. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero de la cafetería	42
Gráfica 8. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en el tablero de la cafetería	42
Gráfica 9. Curvas de carga por fase en el tablero de la sala de exposición	45
Gráfica 10. Curva de tensión por fase en el tablero de la sala de exposición	45
Gráfica 11. Curva del factor de potencia en el tablero de la sala de exposición	46
Gráfica 12. Curva de la frecuencia en el tablero de la sala de exposición	46
Gráfica 13. Curva de la potencia activa en el tablero de la sala de exposición	47
Gráfica 14. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero de la sala de exposición	47
Gráfica 15. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero de la sala de exposición	48
Gráfica 16. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en el tablero de la sala de exposición	48
Gráfica 17. Curvas de carga por fase en el tablero TA7	50
Gráfica 18. Curvas de tensión por fase en el tablero TA7	51
Gráfica 19. Curva del factor de potencia en el tablero TA7	51
Gráfica 20. Curva de la frecuencia en el tablero TA7	52
Gráfica 21. Curva de la potencia activa en el tablero TA7	52
Gráfica 22. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero TA7	53

Gráfica 23. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero TA7	53
Gráfica 24. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en el tablero TA7	54
Gráfica 25. Curvas de carga por fase en el tablero TD6	56
Gráfica 26. Curva de tensión por fase en el tablero TD6	56
Gráfica 27. Curva del factor de potencia en el tablero TD6	57
Gráfica 28. Curva de la frecuencia en el tablero TD6	57
Gráfica 29. Curva de la potencia activa en el tablero TD6	58
Gráfica 30. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero TD6	59
Gráfica 31. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero TD6	59
Gráfica 32. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en el tablero TD6	60
Gráfica 33. Curvas de carga por fase en el tablero TF4	62
Gráfica 34. Curva de tensión por fase en el tablero TF4	62
Gráfica 35. Curva del factor de potencia en el tablero TF4	63
Gráfica 36. Curva de la frecuencia en el tablero TF4	63
Gráfica 37. Curva de la potencia activa en el tablero TF4	64
Gráfica 38. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero TF4	64
Gráfica 39. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero TF4	65
Gráfica 40. Curvas de carga por fase en la acometida principal	67
Gráfica 41. Curvas de tensión por fase en la acometida principal	67
Gráfica 42. Curva del factor de potencia en la acometida principal	68
Gráfica 43. Curva de la frecuencia en la acometida principal	68
Gráfica 44. Curva de la potencia activa en la acometida principal	69
Gráfica 45. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en la acometida principal	69
Gráfica 46. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en la acometida principal	70
Gráfica 47. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en la acometida principal	70
Gráfica 48. Comportamiento del TDD para la fase 1 en la acometida principal	72

Gráfica 49. Comportamiento del TDD para la fase 2 en la acometida principal	72
Gráfica 50. Comportamiento del TDD para la fase 3 en la acometida principal	72

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Diagrama unifilar sede centro	80
Anexo B. Formato de visitas a tableros	81
Anexo C. Cronograma de mediciones	88
Anexo D. Catálogo del equipo de medida Circutor AR5	89
Anexo E. Cuadro de resumen comparativo	137

INTRODUCCIÓN

La luz artificial ha hecho que el hombre aproveche más su tiempo libre, además, ha sido una herramienta fundamental para su progreso y bienestar. Esta ha hecho que todas y cada una de las actividades cotidianas de las personas no se vean interrumpidas al momento de ocultarse el sol, permitiendo realizarlas de una manera más cómoda y segura ya que se puede trabajar, viajar, leer, divertirse y descansar entre otras.

Por más de veinte años los balastos electromagnéticos han sido los únicos elementos disponibles en el mercado que controlan las bombillas fluorescentes. Los últimos adelantos de la tecnología han desarrollado los nuevos balastos electrónicos, los cuales se están empezando a instalar en la industria Colombiana. Ante la posibilidad de remplazar masivamente los sistemas de iluminación convencionales por los nuevos balastos de alto rendimiento en los sectores industrial, comercial, y residencial, las empresas y entidades del sector eléctrico han empezado a mostrar cierto interés para determinar sus condiciones reales de operación con el fin de crear mecanismos normativos y reguladores que protejan los sistemas de distribución de las perturbaciones que pueden causar estas nuevas cargas no lineales.

Este proyecto pretende hacer una evaluación de la calidad de potencia en las instalaciones de la Universidad ya que como se pudo encontrar en la bibliografía algunos estudios realizados han mostrado que esta calidad de potencia se está viendo afectada por los componentes no lineales que últimamente se han venido instalando, uno de ellos, los balastos electrónicos.

La revista **Transactions on Power Delivery** de la IEEE en algunos artículos publicados como son: **“Effect of High Efficiency Lighting on Power Quality in Public Buildings 1995”**, **“Power Pollution Caused by Lighting Control Systems 1991”** y **“The Effect of Modern Compact Fluorescent Lights on Voltage Distortion 1993”**. Hablan acerca los problemas generados por la implantación de los balastos electrónicos en la calidad de la potencia.

Mediante este estudio se pretende contribuir al mejoramiento de la calidad de potencia identificando la problemática que presentan los armónicos para los e

qu coastos para remediar este problema.

Los grandes objetivos que plantea este trabajo son los siguientes:

- Evaluar la influencia que presentan las bombillas fluorescentes con balastos electrónicos en la calidad de potencia.
- Consultar la información teórica para entender conceptualmente el problema y los daños que se ocasionan las cargas no lineales.
- Reunir la información más relevante de las instalaciones de la Universidad de la Salle sede Centro para la captura de medidas y parámetros eléctricos con el fin de analizar la información para luego cuantificar la problemática ocasionada por el uso de los balastos electrónicos.

A manera de presentación, el primer capítulo introduce una base teórica acerca del estudio e importancia de los armónicos en sistemas de distribución, así como definiciones básicas que facilitan la comprensión del desarrollo de este proyecto.

El segundo capítulo presenta la teoría de funcionamiento de la bombilla fluorescente, haciendo énfasis en sus parámetros más importantes y hace una descripción de los tipos de balastos y su manera de conexión con los cuales funcionan este tipo de bombillas. Adicionalmente se presentan las ventajas y desventajas de este nuevo tipo de iluminación.

En el tercer capítulo se presentan los criterios que se tuvieron en cuenta para la selección de sitios donde se efectuarían las mediciones. Adicionalmente se presenta una breve descripción del equipo utilizado para el registro de las mediciones y de la metodología empleada para la captura de información.

En el cuarto capítulo se muestran los resultados obtenidos en las mediciones así como un análisis detallado fruto del procesamiento de la información capturada.

Este trabajo termina estableciendo las conclusiones y recomendaciones más importantes sobre la calidad de potencia por armónicos en una instalación que presenta un buen número de equipos de alumbrado fluorescente con balasto electrónico.

Fruto de este trabajo se encontró que las instalaciones de la Universidad de la Salle en la sede centro, la mayoría cumplen con los límites establecidos por las normas IEEE e IEC. Aunque en algunos lugares donde se mezclan los balastos electrónicos con los electromagnéticos estas normas son violadas de manera considerable.

1. GENERALIDADES

1.1 CALIDAD DE POTENCIA

La calidad de potencia es un término por medio del cual se entiende el estándar de calidad que debe tener el suministro de la energía en las instalaciones eléctricas, en términos de:

- Tensión o voltaje constante.
- Forma de onda sinusoidal.
- Frecuencia constante.

El estudio de la calidad de potencia, es el primer y más importante paso para identificar y solucionar problemas del sistema de potencia. Los problemas eléctricos pueden incidir en el comportamiento de los equipos y reducir su confiabilidad, disminuir la productividad y la rentabilidad e incluso pueden poner en peligro la seguridad del personal si permanecen sin corregirse.

1.2 BAJA CALIDAD DE POTENCIA

La mala calidad de potencia que se ha venido observando en los últimos años proviene en su mayoría de los equipos electrónicos modernos (computadores, variadores de frecuencia, UPS's, balastos electrónicos, etc.) los cuales presentan un comportamiento de carga no lineal a diferencia de otros equipos que presentan una carga lineal (calefactores eléctricos de resistencias, etc.). Normalmente la energía que requieren los equipos con carga lineal es de 120 voltios y 60 Hz de frecuencia. Sin embargo los equipos electrónicos aprovechan la energía con una mayor eficiencia basada en el modo de interrupción la cual funciona a manera de pulsaciones y por ende la forma de onda del voltaje no es sinusoidal. Estos modernos equipos hacen uso de un dispositivo electrónico que convierte la corriente alterna en corriente directa. Aproximadamente el 50 % de la energía eléctrica pasa por este dispositivo antes de ser finalmente aprovechada. Por lo anteriormente expuesto se puede decir que estos dispositivos tienen efectos secundarios que son los que ocasionan la mala calidad de la potencia. En la mayoría de los casos se entiende que una falla viene acompañada por la destrucción o carbonización de los materiales eléctricos ya que es una de las

formas más visibles y más fáciles de asociar una falla eléctrica, pero los disturbios eléctricos de menor magnitud no causan este tipo de falla inmediata. En su lugar, ellos degradan los componentes eléctricos de las instalaciones, debilitándolos un poco cada vez más.

Los disturbios anteriormente mencionados son, en la mayoría de los casos, los responsables de las fallas inexplicables que ocurren en las diferentes instalaciones eléctricas, pues causan interrupciones del sistema, archivos perdidos, errores de comunicación, datos de prueba imprecisos y en general, un bajo rendimiento del sistema.

1.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

A continuación se presentan los conceptos básicos involucrados en el estudio de la calidad de potencia y su efecto en el funcionamiento de los sistemas de potencia; esto con el fin de lograr mayor claridad en la lectura de este proyecto.

1.3.1 Impulsos. Los impulsos son condiciones de sobrevoltaje que duran menos de medio ciclo. A causa de la forma de onda (tiempos marcados de elevación y descenso), a estos impulso se les llama en ocasiones "transitorios".¹

1.3.2 Spikes. Son los picos de transitorios de tensión muy elevada medidos en kilovoltios que tienen duraciones del orden de micro o nano segundos. Debido a la poca energía que contienen y a su corta duración generalmente traspasan las protecciones. Los causantes de este tipo de perturbación son las descargas atmosféricas o las conmutaciones en las redes de distribución. Los **spikes** pueden causar el mal funcionamiento o el daño de los equipos electrónicos.

1.3.3 Ruido. Número elevado de transitorios presentes en la forma de onda. Es ocasionado por perturbaciones atmosféricas, radares, equipos de soldadura y fuentes de alimentación¹.

1.3.4 Transientes. Son oscilaciones en la forma de onda debido a fallas en el sistema como cortos, apertura o reconexiones de interruptores entre otras.

1.3.5 Interrupciones. Las interrupciones de energía son suspensiones de energía en un determinado tiempo, pueden ser instantáneas o temporales. Las

¹ FINK/BEATY. MANUAL DE INGENIERIA ELECTRICA. Mc Graw Hill, 1995, p. 23-10.

interrupciones de energía instantáneas son las originadas en su mayoría por las tormentas eléctricas y las descargas que estas producen, su tiempo de duración es de varios ciclos. Las interrupciones temporales de energía generalmente ocurren por algún tipo de falla en el sistema de interconexión o de distribución y los elementos que lo conforman como generadores y transformadores, su tiempo de duración puede variar desde algunos segundos hasta varias horas.

1.3.6 Sags. Son los descensos o caídas de tensión manteniendo la frecuencia industrial, los cuales son originados por la puesta en marcha de motores de gran tamaño, caída total de la tensión en las barras o por fallas eléctricas en circuitos alimentados desde la misma fuente. Su tiempo de duración es de dos segundos o menos.²

1.3.7 Swells. Al contrario de los **sags**, los **swells** son incrementos de la tensión, también manteniendo la frecuencia industrial, debidos a descargas atmosféricas o interrupciones en cargas grandes y su tiempo de duración puede ser de medio ciclo hasta algunos segundos².

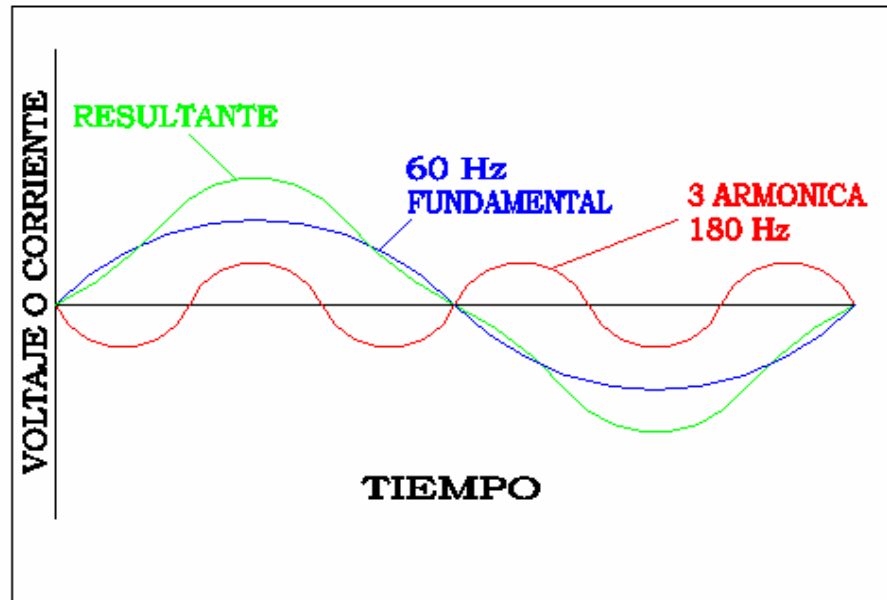
1.3.8 Titileo o Flicker. Es una variación de tensión de entrada con una duración suficiente como para percibir un cambio en la intensidad luminosa o parpadeo en bombillas incandescentes y fluorescentes.

1.3.9 Armónicos. Los armónicos son corrientes o tensiones con frecuencias enteras o múltiplos de números enteros de frecuencias fundamentales. Cuando éstas se combinan con las ondas sinusoidales fundamentales, forman una onda distorsionada, repetitiva, no sinusoidal, como se muestra en la (figura 1). Equipos de consumo no lineal como televisores o computadores generan corrientes armónicas que pueden causar problemas de distorsión y esto se refleja en:

- Operación errática del equipo computarizado.
- Sobrecalentamiento de equipo y conductores.
- Disparo de interruptores.

² FINK/BEATY. MANUAL DE INGENIERIA ELECTRICA. Mc Graw Hill, 1995, p. 23.5.

Figura 1. Forma de onda ocasionada por una distorsión armónica.



1.4 ARMONICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION

En la actualidad, con la aparición de una gran cantidad de cargas no lineales como rectificadores, inversores, balastos electrónicos de alumbrado fluorescente, etc, el estudio de los armónicos en sistemas eléctricos ha cobrado una gran importancia por su efecto nocivo en el funcionamiento de computadores, sistemas de comunicación, sistemas de control y otros equipos de estado sólido, cuyo efecto varía según la cantidad de los equipos mencionados anteriormente. El grado para el cual se toleran los armónicos está determinado por la susceptibilidad de las cargas. Por ejemplo, la presencia de armónicos de tensión o corriente producen campos eléctricos y magnéticos que impiden el funcionamiento satisfactorio de sistemas de comunicación en virtud de su proximidad, dado que la perturbación es función de la amplitud y la frecuencia de los componentes armónicos.

Los sistemas de iluminación fluorescentes son de gran popularidad debido a su gran ventaja dada en lúmenes/vatios frente a la que se obtiene con las bombillas incandescentes tradicionales. Debido a su mayor eficiencia son usadas cada vez más en áreas comerciales y residenciales y por consiguiente consumen una parte

considerable de potencia en los sistemas de distribución. Sin embargo, la forma de onda de corriente de estas bombillas es, en su mayoría, no sinusoidal debido a su mecanismo de descarga y a su balasto electrónico.

Las bombillas fluorescentes brindan un ahorro de energía significativo frente a las incandescentes. Como resultado de esto hacen parte de programas de conservación de energía que se llevan a cabo en aplicaciones tanto en el sector residencial como en el comercial. Por otra parte, las bombillas fluorescentes tienden a incrementar los niveles de distorsión armónica en los sistemas de distribución. Se ha encontrado que este tipo de bombillas presenta un alto nivel de distorsión armónica en la onda de corriente lo que provoca contaminación en el sistema y problemas en la operación de equipos sensibles a este tipo de distorsión armónica. Es probable que al difundir su uso, se verá afectada la calidad de servicio del sistema gracias a sus características y su principio de funcionamiento.³

Por lo anteriormente mencionado, para implementar el uso de estas bombillas es necesario conocer sus características y parámetros de funcionamiento como también el nivel de distorsión que genera un sistema de distribución como el Colombiano, con un valor de tensión dado y que alimenta cargas con características de funcionamiento especiales. Es conveniente realizar estudios en los lugares donde se esté utilizando este tipo de iluminación para tener en cuenta los efectos de la distorsión armónica debidos a las cargas no lineales y en particular de las bombillas fluorescentes. Este proyecto pretende brindar aportes para cuantificar el grado de distorsión de las corrientes y tensiones en las instalaciones eléctricas sirviendo este tipo de cargas.

1.5 DISTORSION ARMONICA

La distorsión armónica es una forma de ruido eléctrico. Es la superposición de señales con múltiplos de la frecuencia fundamental de la potencia sobre la onda sinusoidal de la misma. Las cargas lineales, las que toman corriente en proporción directa del voltaje aplicado, no generan grandes niveles de armónicos. Las cargas no lineales toman corriente en pulsos. Estas corrientes de pulsos crean caídas de voltaje en todo el sistema como resultado de la interacción de la corriente con la impedancia del sistema. Las distorsiones de corriente creadas por cargas no

³ MCCLUSKEY R., DWYER R., "Evaluation of Harmonic Impact from Compac Fluorescent Light on Distribution Systems" IEEE Transaction on Power System. 1995.

lineales pueden crear distorsión del voltaje más allá de las instalaciones internas de los terrenos de la planta, a través del sistema de la compañía de servicio o en las instalaciones de otro vecino. Las cargas concentradas que generan grandes niveles de terceros armónicos pueden dar lugar a una corriente de neutro mucho más alta que la que normalmente se encuentra en circuitos en los que las corrientes de retorno de las diferentes fases se anulan.

La distorsión armónica, se puede dividir en dos clases, distorsión en corriente y distorsión en tensión. Teniendo en cuenta que en un sistema eléctrico la tensión es común para todas las cargas presentes, alguna distorsión de tensión resulta en una distorsión correspondiente de corriente asumiendo que la impedancia de la fuente es muy baja. Por otro lado, una distorsión en corriente resulta en una distorsión de tensión solo hasta cierto punto en que la impedancia de la fuente permita un acople común de impedancia.

La distorsión armónica puede ser causada por el servicio de suministro o por la carga. Respecto al suministro del sistema, el porcentaje de impedancia (% Z) es un parámetro importante para definir una fuente de potencia. Esto puede determinar la regulación de tensión en la carga y la capacidad de resistir picos de corriente desde la carga.

$$\%Z = (I_{nom}/I_{cc}) \times 100$$

Donde:

%Z es el porcentaje de impedancia.

I_{nom} es la corriente de carga máxima en amperios.

I_{cc} es la corriente máxima de corto circuito, disponible desde la fuente, en amperios.⁴

1.6 FACTOR ARMONICO

Es la raíz cuadrada de la relación entre la sumatoria de los cuadrados del total de las amplitudes de todos los armónicos y el cuadrado del valor de la fundamental, todo expresado como un porcentaje de la fundamental.

$$HD = \sqrt{\frac{\sum a_n^2}{a_1^2}} \times 100\% \rightarrow n = 2, 3, 4, 5, \dots$$

⁴ DAVID KREISS. "Harmonic Analyser helps solve power problems". E.C. Magazine. March 1989, p. 73-76.

1.7 DISTORSION ARMONICA TOTAL

Este término es comúnmente usado para definir el “factor de distorsión armónico total” ya sea para corriente o tensión, así:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \times 100$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \times 100$$

1.8 FACTOR DE DISTORSION DE DEMANDA

El factor de distorsión de demanda o TDD es un indicador que tiene en cuenta la evaluación temporal de los porcentajes de los THD's sobre un periodo de tiempo determinado. El factor de distorsión de demanda es la multiplicación del THD por la corriente de carga en este instante dividido por la corriente máxima en un determinado tiempo.

$$TDD = THD \times \frac{I_{CARGA}}{I_{CARGA \text{ MAX}}}$$

1.9 FACTOR DE DISTORSION

Con el incremento de cargas no lineales en el sistema de distribución se ha creado una gran preocupación sobre cómo éstas afectan el factor de potencia así como su definición clásica. En un circuito de corriente alterna se tiene potencia aparente (tensión eficaz por la corriente eficaz medida en voltamperios) y potencia activa (medida en vatios). Es así como el factor de potencia es la razón entre estas dos:

$$F.P. = \text{potencia real} / \text{potencia aparente}$$

Se debe empezar a cambiar el concepto clásico del factor de potencia cuando hay cargas no lineales, como por ejemplo las fuentes de potencia usadas en telecomunicaciones y equipos de cómputo. Debido al sistema de rectificación que estos equipos utilizan, la corriente solo fluye en una parte del ciclo y su forma se parece a un pico (ver figura 2). Esta onda puede considerarse como una componente fundamental mas un número de armónicos múltiplos de la frecuencia fundamental. Los armónicos, aunque están presentes en la forma de onda y en la potencia aparente, no hacen contribución a la potencia real.

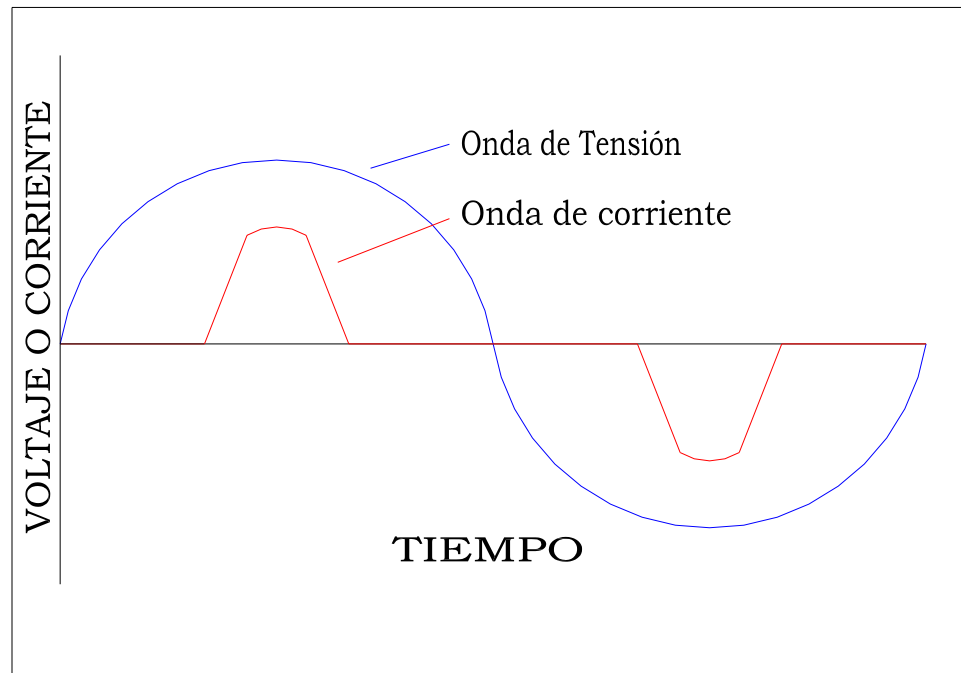
Si se tiene que todo el factor de potencia es debido al factor de distorsión, entonces:

$$\text{Potencia real} = \text{Potencia aparente} * \text{factor de distorsión}$$

Si la distorsión es medida como la razón entre la corriente fundamental y la corriente total, entonces:

$$\text{Potencia real} = \text{potencia aparente} * (\text{corriente fundamental} / \text{corriente total})$$

Figura 2. Forma de onda de corriente no sinusoidal.



Debido a lo complejo de la forma de onda de la corriente, la medición de este factor es muy complicada. Es por esto que la medición del factor de potencia implica tanto el factor de desplazamiento como el factor de distorsión. Por consiguiente, la definición será:

$$\begin{aligned}\text{Potencia real} &= \text{Potencia aparente} * \text{F.P} \\ \text{F.P} &= \text{Factor de desplazamiento} * \text{Factor de distorsión} \\ \text{Potencia real} &= \text{Potencia aparente} * \text{F. Desplazamiento} * \text{F. Distorsión}\end{aligned}$$

Esto muestra que la potencia real entregada a la carga se ve afectada no solo por la tensión y la corriente (potencia aparente) sino también es afectada por el ángulo de fase de la fundamental de corriente respecto a la onda de tensión que es el factor de desplazamiento y por la razón de la fundamental de corriente respecto a la corriente total que es el factor de distorsión; si la forma de onda de la corriente es sinusoidal pura no hay armónicos presentes, entonces, el factor de distorsión es uno.⁵

1.10 FACTOR DE BALASTO

Es la medida de la capacidad que tiene el balasto para producir luz (lúmenes) en una bombilla fluorescente. El factor del balasto es la razón que hay entre la luz de salida producida por un balasto comercial contra la luz producida por la misma bombilla en condiciones de laboratorio.

$$\text{Factor de Balasto} = \frac{\text{Luz producida por un balasto comercial}}{\text{Balasto en condiciones perfectas de laboratorio (100 \% de salida de luz)}}$$

1.11 FACTOR DE POTENCIA DE BALASTO

El factor de potencia del balasto es la medida de que tan eficiente es la conversión de voltaje y corriente suministrados por la fuente en vatios utilizados por el balasto.

$$\text{Factor de Potencia de Balasto} = \text{Vatios de entrada} / V_{\text{LINEA}} * I_{\text{LINEA}}$$

⁵ MITCHELL JOHN E. "Distortion Factor: The new problem of Power Factor. IEEE Transaction on Power System. 1992.

1.12 FUENTES DE LOS ARMONICOS

1.12.1 Fuentes de corrientes armónicas. Las fuentes de las corrientes armónicas son las que involucran los dispositivos de electrónica de potencia ya que los circuitos electrónicos utilizan el paso por cero de la frecuencia fundamental del sistema de alimentación como referencia de tiempos; sin embargo, la distorsión armónica aumenta este paso por cero ocasionando el mal funcionamiento de estos equipos. Otras fuentes de corrientes armónicas son las máquinas con núcleo magnético, como los transformadores ya que cuando estos se encuentran en saturación producen calentamiento y aumento de las pérdidas debidas al incremento en los valores eficaces de las corrientes. Algunos ejemplos de los equipos que producen corrientes armónicas pueden ser:

- Variadores de velocidad.
- U.P.S.
- Rectificadores industriales.
- Computadores.
- Transformadores en saturación.

1.12.2 Fuentes de voltajes armónicos. Algunas de las mayores fuentes de los armónicos de voltaje son los dispositivos eléctricos que trabajan con el arco eléctrico, tales como:

- Hornos de arco.
- Equipos de soldadura.
- Bombillas de descarga.

1.12.3 Efectos de los armónicos en diferentes equipos eléctricos:

1.12.3.1 Transformadores. La disminución de la potencia aparente efectiva del transformador es uno de los principales efectos nocivos en éstos ya que los armónicos producen calentamiento en los bobinados.

1.12.3.2 Condensadores. El deterioro en los dieléctricos de los condensadores es el principal efecto nocivo para éstos pues, si la adición de condensadores sintoniza el sistema a una resonancia cercana a la frecuencia armónica presente, estos pueden llegar a sobrecargarse o a quemarse.

1.12.3.3 Conductores. En los conductores las corrientes armónicas producen calentamientos debido al incremento de su resistencia y esto se produce gracias a el efecto **skin** o piel, el cual consiste en que a medida que aumenta la frecuencia, la corriente tiende a circular por la parte exterior del conductor y no por la sección transversal dispuesta para esto, produciendo aumento de la resistencia y alto calentamiento llegando a quemar el conductor.

1.12.3.4 Equipos de medida, protección, control y comunicaciones. En estos equipos los armónicos pueden tener varios efectos como errores en las mediciones al variar los valores eficaces de los voltajes y corrientes medidas. En los equipos de protección los armónicos pueden llegar a generar picos de corriente que pueden producir disparos erróneos de las protecciones y en los equipos de control y comunicación, los armónicos producen ruido eléctrico, errores en la regulación, falsas salidas e interferencia.

1.12.3.5 Iluminación. Los efectos de los armónicos en las bombillas producen una vida útil más corta ya que cuando operan con voltajes distorsionados éstas se vuelven más sensibles a los niveles de tensión de operación.

1.12.3.6 Motores. Los armónicos de corriente interactúan con el flujo producido por los entrehierros ocasionando torques que pueden restarse o sumarse al fundamental, o pueden llegar a producir oscilaciones mecánicas indeseables.

1.12.3.7 Distribución. La onda de tensión de la empresa suministradora de la energía puede llegar a distorsionarse debido a la inyección de corrientes armónicas por parte de los usuarios, afectando así el sistema de distribución.

1.13 LA NORMA IEEE 519-92⁶

La norma establece pautas para disminuir, limitar y controlar los porcentajes de distorsión armónica en la distribución para los sistemas de potencia. En los Estados Unidos es el estándar IEEE 519-92, el cual se puede encontrar mencionado también en la resolución 070 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) para Colombia. Esta norma expresa, como primera, medida que los usuarios deben responsabilizarse para limitar la cantidad de las corrientes armónicas sobre el sistema de potencia en general.

⁶ IEEE. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS.

La norma expresa que la máxima amplitud armónica individual en el voltaje causada por un usuario no debe exceder los límites de la tabla 1, en sistemas que pueden ser caracterizados por impedancias de cortocircuito. La relación I_{cc}/I_L es la razón de la corriente de corto circuito disponible en el punto de acoplamiento común para la máxima corriente de carga fundamental del usuario.

Tabla 1. Bases para límites de corrientes armónicas.

Relación I_{cc}/I_L	MAXIMA AMPLITUD ARMONICA INDIVIDUAL EN VOLTAJE %	TIPO
10	2.5 – 3.0	Relacionado con sistemas
20	2.0 – 2.5	1 – 2 Clientes Grandes
50	1.0 – 1.5	Clientes relativamente grandes
100	0.5 – 1.0	5 – 20 clientes de mediano tamaño
1000	0.05 – 0.1	Muchos clientes pequeños

1.13.1 Límites de distorsión de corriente. Los límites de distorsión armónica establecidos en esta norma son para establecer la máxima distorsión de corriente permisible para un usuario. Los siguientes límites dados en las tablas son usados como valores de diseño del sistema para casos extremos de operación normal no mayores a una hora y para casos de periodos cortos, como durante condiciones de arranque o condiciones inusuales, estos límites pueden ser excedidos en un 50 %. La tabla 2 muestra los límites de corriente armónica basada en el tamaño de los sistemas de potencia para la cual la carga es conectada. Siendo I_{cc} la corriente de cortocircuito e I_L la corriente de carga, la tabla muestra los límites para los armónicos impares y para los pares se considera el 25% del valor mostrado.

Tabla 2. Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución generales (<69 kV).

MAXIMA DISTORSION DE CORRIENTE ARMONICA EN PORCENTAJE DE LA CORRIENTE DE CARGA						
ARMONICAS DE CORRIENTE INDIVIDUAL (IMPARES)						
I_{cc}/I_L	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<h	TDD I (%)
<20	4.00	2.00	1.50	0.60	0.30	5
20<50	7.00	3.50	2.50	1.00	0.50	8
50<100	10.00	4.50	4.00	1.50	0.70	12

100<1000	12.00	5.50	5.00	2.00	1.00	15
>1000	15.00	7.00	6.00	2.50	1.40	20

1.13.2 Límites de distorsión de voltaje. Los límites de distorsión de voltaje recomendados en la tabla 3 son usados como valores dados del sistema para casos extremos de operación normal (condiciones perdurablemente grandes, en una hora). Para periodos cortos, durante condiciones inusuales o arranque de motores, los límites pueden excederse en un 50 %.

Tabla 3. Límites de distorsión de voltaje.

VOLTAJE DEL BARRAJE EN EL PUNTO DE ACOPLAMIENTO COMUN (PCC).	PORCENTAJE DE DISTORSION ARMONICA INDIVIDUALDE VOLTAJE.	PORCENTAJE DE DISTORSION ARMONICA TOTAL DE VOLTAJE (THD %)
69 kV y menores	3.0	5.0
69001 hasta 161 kV	1.5	2.5
161001 y mayores	1.0	1.5

1.14 NORMA IEC⁷

La norma IEC 61000 en su parte 3-2 habla sobre la limitación de corrientes armónicas inyectadas al sistema de suministro público. Esta parte de la norma es aplicable a los equipos eléctricos y electrónicos que tienen una corriente de entrada inferior o igual a los 16 A por fase y que van conectados a un sistema de distribución público de bajo voltaje.

1.14.1 Clasificación de los equipos. Para cumplir con el propósito de limitar las corrientes armónicas la norma ha clasificado los equipos de la siguiente manera:

- Equipos Clase A:
 - Equipos trifásicos balanceados.
 - Aparatos domésticos, excluyendo los equipos identificados como clase D.

⁷ IEC 61000-3-2. COMISION ELECTROTECNICA INTERNACIONAL.

- Máquinas herramientas, excluyendo las máquinas herramientas portátiles.
- Los reductores de luz (**dimmers**) para bombillas incandescentes.
- Los equipos de audio.
- Equipos Clase B:
 - Máquinas herramientas portátiles.
 - Equipos de soldadura de arco.
- Equipos Clase C:
 - Equipos de iluminación.
- Equipos Clase D: equipos que tienen la potencia especificada de acuerdo a los fabricantes; menores e iguales a 600 W, o de los siguientes tipos:
 - Computadores personales y sus monitores.
 - Receptores de televisión.

1.14.2 Límites para los equipos clase A. Para los equipos clase A, los armónicos de corriente de entrada no pueden exceder los valores de la tabla 4.

1.14.3 Límites para equipos clase B. Para los equipos clase B, los armónicos de la corriente de entrada no deben exceder los valores de la tabla 4 multiplicados por un factor de 1.5, los cuales se muestran en la tabla 5.

1.14.4 Límites para equipos clase C.

- Potencia activa de entrada > 25 W: Para equipos de iluminación que tienen una potencia activa de entrada mayor que 25 W, las corrientes armónicas no pueden exceder los valores de la tabla 6.
- Potencia activa de entrada ≤ 25 W: Los equipos de iluminación de descarga que tienen una potencia activa de entrada menor o igual a 25 W, deben cumplir con uno de los siguientes requerimientos:
 - Las corrientes armónicas no deben exceder los límites de la relación de potencia de la tabla 6, columna 2.
 - La corriente del tercer armónico, expresada como un porcentaje de la corriente fundamental, no puede exceder el 86 % y el quinto no puede exceder el 61%.

Tabla 4. Límites para equipos clase A.

Orden Armónico (n)	Máxima corriente armónica permisible (A)
Armónicos impares	
3	2.3
5	1.14
7	0.77
9	0.4
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 (15/n)$
Armónicos pares	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 (8/n)$

Tabla 5. Límites para equipos clase B.

Orden Armónico (n)	Máxima corriente armónica permisible (A)
Armónicos impares	
3	3.45
5	1.71
7	1.15
9	0.6
11	0.49
13	0.245
$15 \leq n \leq 39$	$0.172 (15/n)$
Armónicos pares	
2	1.242
4	0.494
6	0.345
$8 \leq n \leq 40$	$0.265 (8/n)$

1.14.5 Límites para equipos clase D. Para los equipos clase D, las corrientes armónicas y la potencia pueden ser medidas o son definidas por los fabricantes.

Las corrientes de entrada a las frecuencias armónicas no pueden exceder los valores de la tabla 7.

Tabla 6. Límites para equipos clase C.

Orden Armónico (n)	Máxima corriente armónica permisible expresada como un porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental (%)
2	2
3	30
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$	3
(únicamente armónicos impares)	

Tabla 7. Límites para equipos clase D.

Orden Armónico (n)	Máxima corriente armónica permisible por vatio (mA/W)	Máxima corriente armónica permisible (A)
3	3.4	2.3
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.33
$13 \leq n \leq 39$	$3.85/n$	Ver tabla 3
(únicamente armónicos impares)		

1.15 FILTROS DE ARMONICOS

En muchas empresas hay un desconocimiento de los efectos que tienen los armónicos en las instalaciones eléctricas, ya que éste fenómeno eléctrico ha ido en aumento y afecta directamente a los equipos eléctricos y electrónicos de las empresas, es por lo anterior que se deben tomar medidas adecuadas para eliminarlos o por lo menos neutralizarlos. Una solución es instalar filtros de

eliminación de armónicos los cuales mejoran el factor de potencia por medio de condensadores y eliminan los armónicos.

1.15.1 Condensadores con aislamiento reforzado. Estos condensadores se emplean cuando el nivel de armónicos es suficiente para provocar sobre tensiones y sobre intensidades en los condensadores que superen lo indicado en las normas. Estos condensadores están fabricados con dieléctrico reforzado especialmente seleccionado para trabajar en condiciones adversas y presentan gran resistencia a las sobrecargas permanentes.

1.15.2 Filtros de eliminación de armónicos. Estos filtros se emplean cuando el objetivo perseguido no es la compensación de la potencia reactiva a la frecuencia fundamental sino la reducción de los armónicos presentes en la red. La eliminación total no es posible, puesto que los filtros siempre presentan una pequeña impedancia. Los filtros de eliminación de armónicos están constituidos por filtros serie de reactancia-condensador para las frecuencias inferiores a 500 Hz o filtros de banda ancha para frecuencias superiores a 500 Hz, sintonizados a la frecuencia del armónico que se desea eliminar. En la práctica, los filtros se sintonizan a una frecuencia ligeramente inferior a la del armónico correspondiente.

2. BOMBILLAS FLUORESCENTES

Las bombillas fluorescentes son de descarga eléctrica y de mercurio a baja presión, en las que un recubrimiento de fósforo transforma en luz parte de la energía ultravioleta generada por la descarga. La bombilla es un pequeño tubo de vidrio controlado por un dispositivo llamado balasto el cual puede ser electromagnético, electrónico o híbrido, este tipo de bombillas se han venido implementando ya que ofrecen un rendimiento muy superior a las bombillas incandescentes. Las tecnologías originales calificaron a menudo las bombillas fluorescentes como grandes y pesadas, limitando así sus posibles aplicaciones; sin embargo, la innovación rápida ha conducido a disponer de una nueva generación de productos compactos, ligeros y adecuados para la mayoría de instalaciones que anteriormente usaban bombillas incandescentes.

Los fabricantes de bombillas fluorescentes se han ideado todo tipo de presentaciones para hacer aun más llamativo y novedoso el producto; por ejemplo el aspecto económico es una de las ventajas y estrategias más utilizadas, ya que por un precio mas bajo, se puede comprar una bombilla compacta de 18 vatios que equivaldría a una bombilla incandescente de 75 vatios. Además la duración de la bombilla fluorescente es mucho mayor; 10.000 horas contra menos de 1000 de la tradicional.

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBILLAS FLUORESCENTES

La bombilla fluorescente es una bombilla de descarga eléctrica en vapor de mercurio a baja presión y usa uno o más tubos individuales rectos o doblados conectados por un puente. La emisión principal de luz de la bombilla proviene de un recubrimiento de material fluorescente en las paredes del tubo. Cuando se aplica el voltaje apropiado a las terminales de la bombilla ya sea en sus extremos o en el casquillo, la corriente produce un arco al circular entre los electrodos a través del gas de relleno (Vapor de mercurio). Esta genera alguna radiación visible, principalmente ultravioleta a 253.7 nm, que a su vez excita el recubrimiento de fósforo para emitir luz.

Las bombillas fluorescentes se fabrican principalmente en tres tipos distintos, dependiendo de sus circuitos de operación:

- Cátodo caliente, arranque de precalentamiento.
- Cátodo caliente, arranque instantáneo.
- Cátodo frío.

Las bombillas fluorescentes de cátodo frío son las que usan electrodos de forma tubular, de hierro o níquel, que se pueden recubrir en sus superficies interiores con materiales emisores de electrones. Estos cátodos operan a temperaturas que limitan las bombillas a densidades de baja corriente.

La potencia de la bombilla es proporcional al área de superficie del tubo o longitud de la bombilla para diámetros iguales.

$$L = \frac{P}{k * \pi * d}$$

Donde

L = Longitud del tubo de la bombilla (cm)

P = potencia nominal (W)

d = diámetro del tubo (cm)

k = constante que depende de la potencia de la bombilla

Teniendo en cuenta la constante k, se puede obtener una ecuación para determinar la relación entre la longitud de la bombilla con la potencia y el diámetro.⁸

$$L = 8.67 * \frac{P}{d}$$

⁸ BEMIS J., "Compact Fluorecent Lamp Test". IEEE 1992.

2.2 PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBILLA FLUORESCENTE.

2.2.1 Tensión de alimentación. Para mejor funcionamiento, por lo general las bombillas deben operar a voltajes $\pm 10 \%$ de sus puntos de operación de diseño. Si se hacen operar a voltajes más bajos, puede dar como resultado una vida útil más corta y un arranque incierto y, si operan a voltajes más altos, hay el riesgo de sobrecalentamiento de los componentes del balasto así como acortamiento de la duración de la bombilla. La mayoría de estas bombillas están diseñadas para operar a 120 V de corriente alterna eficaz.

2.2.2 Frecuencia. La frecuencia nominal de funcionamiento de este tipo de bombillas está entre 50-60 Hz.

2.2.3 Temperatura de funcionamiento. La temperatura de funcionamiento es un factor importante ya que el ambiente térmico que rodea la bombilla fluorescente afecta su emisión de luz. La emisión de luz de una bombilla fluorescente es función de la presión del vapor de mercurio que, a su vez, es función del punto más frío de la pared de la bombilla, lugar donde se condensa el exceso de mercurio.

Cada bombilla tiene una presión óptima de vapor, y por tanto una temperatura del punto mas frío de la pared de la bombilla, con la que se obtiene un máximo de emisión de luz.

Esta temperatura óptima del punto de la pared de la bombilla se obtiene normalmente con una temperatura ambiente de 25° C, que es la temperatura utilizada en condiciones estándar de prueba. Si la temperatura del punto más frío es superior o inferior al óptimo para este tipo particular de bombilla, la emisión de luz será menor.

2.3 TIPOS DE BALASTOS PARA BOMBILLAS FLUORESCENTES

Los balastos se construyen según las características de los diferentes tipos de bombillas. De acuerdo con su aplicación podemos dividir los balastos para bombillas fluorescentes en los siguientes grupos:

- Balasto para bombillas de Precalentamiento.
- Balasto para bombillas de Encendido rápido.

- Balasto para bombillas de Encendido Instantáneo (**Slimline**).
- Balasto electrónico.
- Balasto híbrido.

2.3.1 Balasto para bombillas fluorescentes de Precalentamiento. Con el sistema de precalentamiento se abrió la era del alumbrado fluorescente en el mercado mundial. Su disposición más sencilla consiste de un balasto, una bombilla y un arrancador conectados en serie.

El arrancador, que se utiliza únicamente para bombillas fluorescentes del tipo precalentamiento, equivale a un interruptor automático que cumple las siguientes funciones: conecta el circuito de los cátodos de las bombillas, permite el paso de la corriente eléctrica y provoca su calentamiento hasta el grado necesario para que estos comiencen a emitir electrones. Una vez obtenido el precalentamiento de los cátodos, automáticamente interrumpe el circuito de los mismos, produciéndose dentro de la bombilla a través del balasto, un alto pico de voltaje inductivo. Conseguido lo anterior, el arrancador permanece desconectado durante el funcionamiento de la bombilla.

En la figura 3, se puede observar la conexión en serie de dos bombillas; debido al sistema de conexión empleado, cualquier falla en una de las bombillas o en uno de los arrancadores, ocasiona que ambos tubos no funcionen, lo cual hace más costoso el mantenimiento, porque no sólo dificulta la identificación del elemento averiado, sino que obliga a una operación más inmediata de recambio.

2.3.2 Balasto para bombillas fluorescentes de Encendido Rápido. Las bombillas de encendido rápido tardan dos segundos como máximo para iniciar su funcionamiento. Los cátodos de las bombillas son diferentes a los de precalentamiento. Estos están formados por un filamento de tungsteno en espiral, mientras que los de las bombillas de arranque rápido están formados por un alambre más fino en forma de espiral triple. El espiral triple conserva más material de recubrimiento y su tamaño pequeño permite usar un voltaje bajo para la corriente de su calentamiento que debe ser permanente durante el funcionamiento de la bombilla. Debido a su bajo voltaje, entre 3 y 4 voltios, el consumo de potencia es pequeño.

Los balastos de encendido rápido están compuestos por bobinas rectoras, los núcleos y las bobinas que suministran la tensión para mantener los cátodos

calientes. El factor de potencia puede ser normal si se usa para una sola bombilla y se puede corregir agregando un condensador.

Los circuitos con bombillas de arranque rápido no requieren arrancador, como se muestra en la (figura 4).

Figura 3. Forma de conexión de una bombilla fluorescente de precalentamiento.

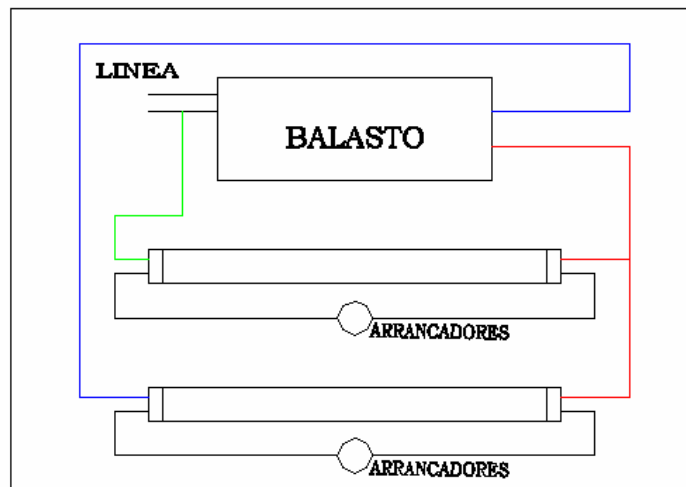
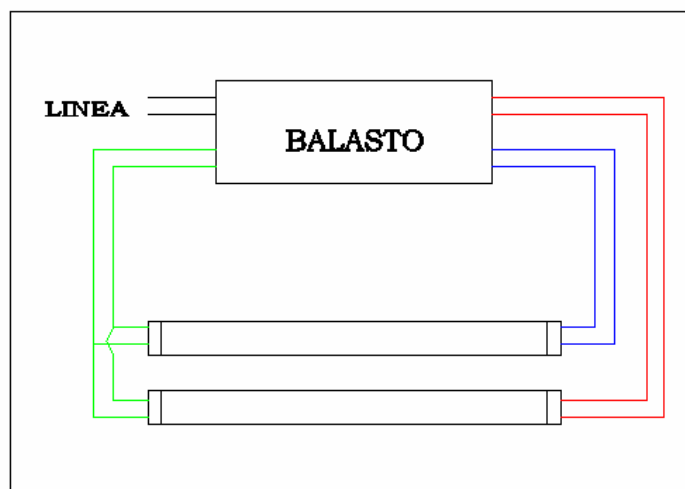


Figura 4. Forma de conexión de una bombilla fluorescente de encendido rápido.

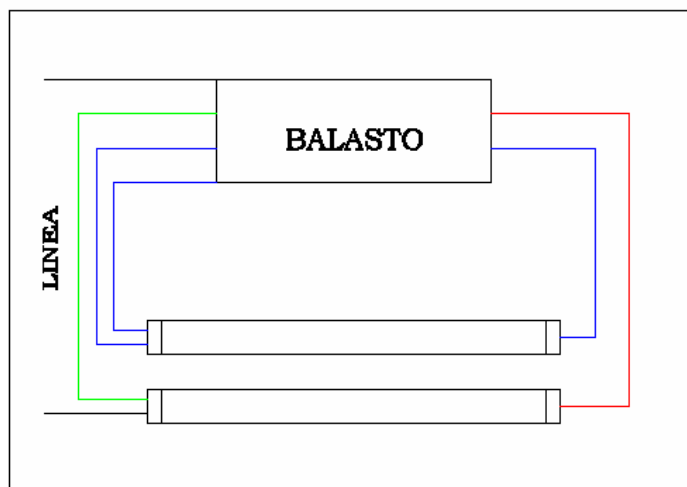


2.3.3 Balasto para bombillas fluorescentes de Encendido Instantáneo. Si se aplica una tensión suficientemente alta en los terminales de una bombilla fluorescente se puede iniciar el arco sin necesidad del calentamiento previo de los cátodos. Estas bombillas normalmente tienen sólo un terminal en cada extremo de ellas y son también conocidas como **SlimLine**.

Los cátodos son de una construcción especial para el arranque en frío. El balasto debe suministrar el alto voltaje necesario para el arranque de las bombillas. Se deben tomar las precauciones necesarias para el remplazo de las bombillas y balastos debido a que la alta tensión es peligrosa para los operarios. Por consiguiente cada vez que se vayan a reemplazar las bombillas y los balastos los circuitos deben estar desconectados.

Los balastos encontrados en la Universidad son electromagnéticos y electrónicos, los electromagnéticos por lo general son utilizados con tubos T12 que son más grandes que los T8 utilizados por los balastos electrónicos. Para bajar costos se han utilizado balastos electromagnéticos con tubos T8, lo cual disminuye la vida útil del tubo. Las bombillas fluorescentes se designan por una letra que indica la forma de la sección transversal del tubo y un número que indica el diámetro en octavos de pulgada, es así que un tubo T12 mide $1\frac{1}{2}$ (12/8) in de diámetro.

Figura 5. Diagrama de conexión de una bombilla fluorescente de encendido instantáneo.



2.4 EL BALASTO ELECTROMAGNETICO.

El balasto electromagnético es un transformador o reactancia con núcleo laminado que se conecta en serie con el tubo y tiene como función principal suministrar una sobretensión inicial, la cual debe caer a la tensión nominal una vez que se haya encendido completamente la bombilla. Esta sobretensión es necesaria para calentar los electrodos y establecer el arco entre estos, menos para la **SlimLine**.

Otra función que tiene el balasto electromagnético es la de limitar la corriente de descarga hasta el valor nominal de la bombilla. La mayor parte de las bombillas fluorescentes operan con balasto electromagnético a 60 Hz, lo cual causa distorsión y un factor de potencia bajo. En este caso se adiciona un condensador al circuito del balasto para corregir el factor de potencia.

Lo característico de algunos balastos electromagnéticos es la presencia de núcleos magnéticos grandes y pesados, los cuales operan a bajas frecuencias (60 Hz), formados por láminas o chapas de acero y de silicio.

2.5 DESVENTAJAS DE LOS BALASTOS ELECTROMAGNETICOS.

Los balastos electromagnéticos, aunque todavía se utilizan y se encuentran en el mercado, ya hacen parte del pasado por lo que en estos momentos presentan muchas desventajas eléctricas, las cuales son:

2.5.1 Pérdidas. Debido al uso de componentes electromagnéticos, existen pérdidas por la presencia de las corrientes de Foucault⁹ e Histéresis. Además, existen pérdidas por calentamiento en el conductor, ocasionándose una caída de tensión entre los extremos del balasto.

2.5.2 Parpadeo. Durante el encendido de un sistema con arrancador existe en algunas ocasiones un parpadeo molesto.

2.5.3 Inestabilidad. Si existen fluctuaciones en la tensión de la red, el balasto simplemente sigue las fluctuaciones de voltaje de la red, causando así los

⁹ FOUCAULT. Jean Bernard León. (1819-1868). Físico Francés.

correspondientes altibajos en la iluminación y la potencia consumida por el sistema.

2.5.4 Temperatura. Puesto que mucha de la energía absorbida por el balasto durante la limitación se convierte en calor, la temperatura del balasto durante su operación depende de la calidad del mismo.

2.5.5 Ruido. Es la vibración que producen las láminas de hierro del núcleo por el campo magnético y sus variaciones. Debido a la acción de la corriente alterna en el núcleo de hierro, el balasto produce normalmente un zumbido. La magnitud de éste depende del diseño y calidad del balasto.

2.6 BALASTO ELECTRONICO

El balasto electrónico hace parte del sistema de alimentación de la bombilla fluorescente, se utiliza para obtener el arranque de la bombilla y limitar su corriente de operación. La ventaja de utilizar este tipo de balasto es que puede operar en un rango de altas frecuencias, por encima de los 25 kHz, lo cual conduce a una mayor eficiencia luminosa incrementándose de 10 a 20% comparada con la obtenida a frecuencias entre 50 y 60 Hz. Por esta razón los balastos electrónicos en altas frecuencias son muy atractivos ya que garantizan un ahorro de energía entre un 20 a 25%. Para los mismos niveles de salida de luz tienen otros beneficios tales como peso y dimensiones reducidas del balasto, reducción del parpadeo (**flicker**) en la bombilla, menos ruido audible, mayor vida de la bombilla, y mayor habilidad para ajustar la salida de luz en la bombilla casi a cualquier nivel cuando se usa un balasto que permite la dimerización.

2.7 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL BALASTO ELECTRÓNICO

Debido a que la operación de bombillas fluorescentes con balastos electromagnéticos presenta desventajas considerables frente a los electrónicos, como son entre otras, el peso del balasto y las pérdidas de potencia ya que éstas últimas corresponden a más del 30% del consumo de potencia de la bombilla, la tecnología ha optado por buscar la manera de reducirlas y un camino para lograr esto es reducir como primera medida el peso del balasto, esto se hace por medio de componentes electrónicos y de este modo buscar también que el balasto tenga una mayor eficiencia incrementando la frecuencia de operación multiplicándola por mil. Por ejemplo, de 50 Hz a 50 kHz este efecto se logra reduciendo la

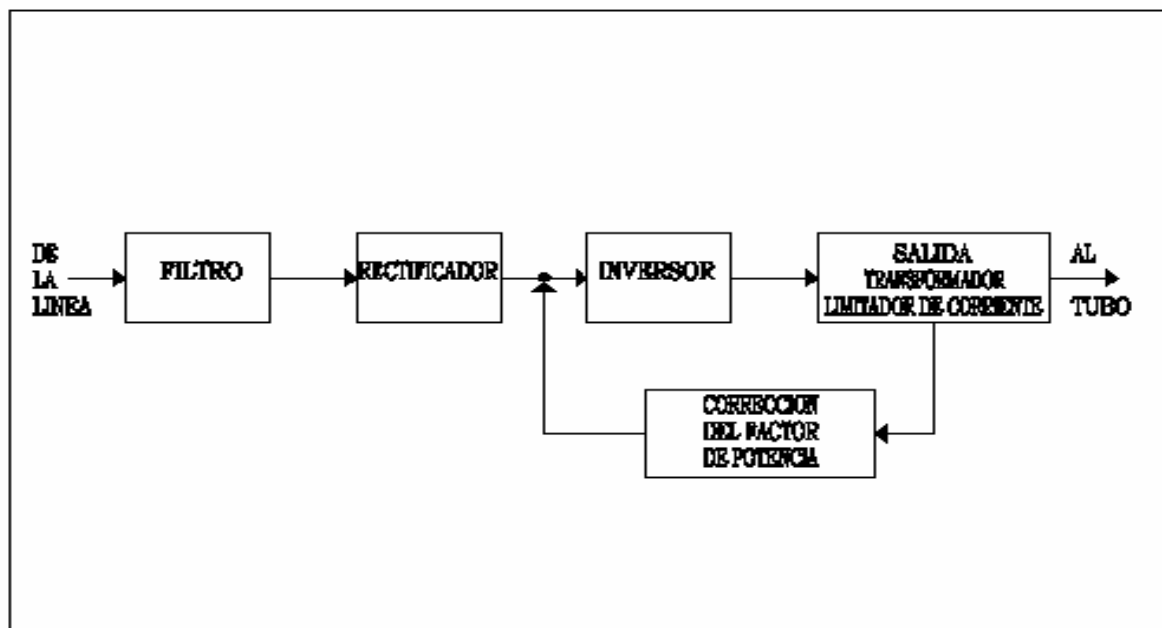
inductancia del balasto en una relación aproximada de 1/1000 (1 mH en lugar de 1 H).

Otras ventajas adicionales que se obtienen con este tipo de balasto son:

- Incremento de la eficiencia lumínica con el aumento de la frecuencia de operación.
- El efecto de titileo (**flicker**) se hace casi invisible para el ojo humano.
- Menos disipación de calor en el balasto

Para obtener la conversión de 50/60 Hz a un rango de 20-50 kHz la tensión de alimentación es rectificada primero y convertida a corriente continua. Esta señal de corriente continua es conmutada a alta frecuencia usando transistores o tiristores y el resultado es una tensión de corriente alterna a alta frecuencia que se usa para operar la bombilla. La (figura 6) muestra el diagrama básico de bloques de un balasto electrónico en forma de puente inversor, usado frecuentemente para convertir tensión de corriente continua en tensión de corriente alterna por encima de 100 V a alta frecuencia.¹⁰

Figura 6. Diagrama básico de bloques de un balasto electrónico.



¹⁰ ADVANCE AND TRANSFORMER CO. "The ABC's of Electronic Ballasts". 1989.

La (figura 6) nos muestra:

- Filtro. El filtro es el encargado de limitar la retroalimentación al sistema de potencia de la interferencia electromagnética, como también la de proteger los componentes internos del balasto de los transientes de la línea.
- Rectificador. El rectificador es el encargado de convertir la tensión de corriente alterna de 60 Hz a tensión de corriente continua.
- Inversor. El inversor rectifica la tensión de corriente continua a una tensión de corriente alterna, la cual trabaja en un rango entre 20 y 60 kHz.
- Limitador de corriente. El limitador de corriente utiliza altas frecuencias para proveer la tensión necesaria para arrancar la bombilla y también para controlar la corriente de la bombilla.
- Corrección del factor de potencia. La retroalimentación del circuito es la encargada corregir el factor de potencia. Esta función es realizada por el condensador en el balasto electromagnético.

Aunque la operación exacta de frecuencia no es crítica, ésta es restringida para frecuencias en un rango entre 20 y 50 kHz. En este rango la eficiencia lumínica de una bombilla se incrementa (aproximadamente de 10% a 20%) comparada con la obtenida a frecuencias entre 50-60 Hz. Con balastos electrónicos, hay más métodos y posibilidades de corregir el factor de potencia y suprimir la distorsión armónica. Aunque por ser los balastos cargas no lineales se ha encontrado que afectan la calidad de potencia generando corrientes armónicas, las cuales a su vez incrementan la distorsión del voltaje en la fuente. Los armónicos que muestran mayor incremento son los de orden impar el 3, 5, 7, 9 y 11 los cuales serán objeto de estudio en este proyecto para ver su comportamiento y compararlos posteriormente con los límites propuestos por la norma IEC que es la encargada de regular estos armónicos.

La relación que existe entre los armónicos y el factor de potencia es mala debido a que los armónicos contribuyen a la parte reactiva de la potencia aparente, lo cual ayuda a bajar el factor de potencia. Como los balastos electrónicos son cargas no lineales que exigen una alta corriente de magnetización para su operación y además generan armónicos se puede decir que el factor de potencia se va ver afectado, por lo anterior este proyecto estudiará el comportamiento del factor de potencia para circuitos que tengan varias bombillas con balastos electrónicos conectados a ellos.

2.8 BOMBILLA COMPACTA CON BALASTO ELECTRONICO INTEGRADO

La gran cantidad de diseños en bombillas compactas con balasto electrónico integrado fueron desarrolladas en la década de los ochentas y se introdujeron en el mercado diversos modelos que abrieron el camino para hallar el reemplazo más eficiente de la bombilla incandescente.

Los fabricantes de este tipo de sistemas de iluminación hacen un esfuerzo constante para mejorar la calidad, costo y eficiencia de sus productos. Este esfuerzo se aplica en dos direcciones: al propio tubo fluorescente, con el fin de obtener mayor rendimiento luminosos y al sistema de alimentación del tubo (balasto electrónico), el cual se utiliza para obtener el arranque de la bombilla y limitar su corriente de operación.

La parte fundamental de estas bombillas es un sistema de manejo electrónico el cual opera en un rango de alta frecuencia (20 a 50 kHz). Dependiendo del diseño son compatibles con tensión de suministro entre 100 y 240 voltios y algunos modelos pueden operar también con fuentes de corriente directa. Esta bombilla con balasto electrónico no se ve afectada en su funcionamiento cuando existen variaciones de tensión en la línea de alimentación, lo que si ocurre con la incandescente, y además presenta un bajo consumo de potencia haciéndola ideal para uso en aplicaciones de emergencia en el sistema de potencia.

2.9 BENEFICIOS DE LAS BOMBILLAS FLUORESCENTES COMPACTAS

Las bombillas fluorescentes compactas proporcionan todas las ventajas de la tecnología fluorescente, brindándole una alta eficiencia, economía de funcionamiento y excelente reproducción cromática. Algunas ventajas que presentan este tipo de bombillas son:

2.9.1 Sustancial ahorro de energía. Hasta un 75% de ahorro en consumo respecto a las bombillas incandescentes de las mismas características de emisión de luz. Lo anterior tiene como resultado una considerable disminución de la emisión de calor debida a pérdidas de energía.

2.9.2 Vida útil más larga. Duran hasta 10.000 horas, diez veces más que las incandescentes, lo cual puede reducir enormemente los costos de mantenimiento de una instalación.

2.9.3 Excelente reproducción cromática. El tri-fósforo de tierras raras que se utiliza como recubrimiento en el interior del tubo, proporciona una luz parecida a las incandescentes, lo que hace difícil distinguir entre ambas.¹¹

2.9.4 Tamaño compacto. Su tamaño y poco peso, hacen a estos productos aptos para la mayor parte de aplicaciones en el hogar y la oficina.

2.9.5 Encendido sin parpadeo. Actualmente estas bombillas brindan la posibilidad de encendido sin parpadeo.

2.9.6 Beneficio del medio ambiente. Cuando se ahorra energía, no solo se economiza dinero sino que se evita todo el daño ambiental que implica generarla. Al reducir el consumo de electricidad, disminuye el nivel de contaminación en la atmósfera.

¹¹ PHILIPS. "Catálogo Bombillas Ahorradoras de Energía".

3. ADQUISICION DE DATOS EN LA UNIVERSIDAD

La recolección de los datos necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado arrojó una idea sobre la calidad de potencia debido a armónicos en diferentes sitios de la universidad y en su totalidad. Para identificar los diferentes sitios en los cuales se tomaron las medidas se hicieron una serie de visitas, en las cuales se clasificaron los tableros de circuitos de la universidad y posteriormente se seleccionaron los más indicados.

3.1 SELECCIÓN DE LOS TABLEROS

En un principio se tuvo acceso al plano del diagrama unifilar de la universidad sede centro (Anexo A) el cual fue prestado por la oficina de Planeación y Arquitectura de la universidad. Una vez ubicados los posibles tableros en los cuales se realizarían las medidas se efectuaron una serie de visitas para determinar y evaluar los diferentes aspectos eléctricos de cada uno de los tableros. Para efectuar las visitas se diseñó un formato en el cual se consignaban los datos de información eléctrica de cada tablero. La información obtenida puede ser vista en el Anexo B. En este anexo se pueden observar los tableros que fueron escogidos.

En los formatos anexos podemos encontrar la información de cada tablero, la cual contiene: el nombre del tablero, su ubicación, el número de circuitos que maneja, el número de circuitos de iluminación que alimenta, el número de luminarias, el tipo de balasto utilizado, su potencia y las observaciones pertinentes en cada visita.

La selección de los tableros para realizar el proyecto estuvo basada en encontrar los tableros que sólo manejaran iluminación, ya que en la Universidad existen otros tipos de cargas que el proyecto no estuvo interesado en evaluar como son las cargas de computadores, UPS's, y otras varias como las que se puede encontrar en las oficinas y laboratorios.

Los tableros que fueron seleccionados necesariamente tenían que alimentar un buen número de bombillas fluorescentes con balastos electrónicos, pero aún así también se seleccionaron tableros en los cuales las bombillas tenían balastos electromagnéticos y los circuitos estaban mezclados, esto con el fin de comparar la calidad de la potencia en los diferentes casos.

Los tableros escogidos fueron: TD6-1, TA 7-1, el tablero de la cafetería, TF 4-1, el tablero de la sala de exposición. Este proyecto también contempló medidas en la acometida principal de la Universidad, la cual está situada en el área de la planta eléctrica.

3.2 METODOLOGIA SEGUIDA

Una vez seleccionados los tableros en los cuales se realizarían las mediciones se procedió posteriormente a tramitar los diferentes permisos ante la oficina de Servicios Generales, para tener acceso a los mismos ya que algunos de ellos se encontraban bajo llave. También era necesario que en el momento de efectuar las mediciones estuviera presente el técnico encargado de turno.

El laboratorio de la facultad de Ingeniería Eléctrica facilitó el préstamo del equipo de medida para desarrollar el proyecto, equipo consistente en el Analizador de Redes **Circutor AR5**. Posteriormente se procedió a registrar los datos en el Analizador de acuerdo con lo establecido en el cronograma de mediciones ver (Anexo C).

Las mediciones se efectuaron los días establecidos teniendo una duración de 10 a 12 horas, esta medición se hizo así ya que era necesario para el proyecto tener la curva de carga de cada tablero y poder analizar el contenido armónico de las señales de corriente y tensión buscando diagnosticar las características de funcionamiento de las instalaciones de la Universidad. El diagrama de conexión del equipo a los tableros se puede apreciar en el Anexo D en la página 11.

3.3 EQUIPO DE MEDICION UTILIZADO.

El equipo de medición utilizado para desarrollar el proyecto fue el Analizador de Redes marca Circutor AR5. El analizador es un instrumento de medida programable que registra en su memoria todos los parámetros eléctricos de la red. El analizador está dotado con cuatro canales de tensión, tres de corriente y uno auxiliar que tiene múltiples funciones, como se muestra en la Figura 7.

El Circutor AR5 tiene la posibilidad de mostrar, por medio de su pantalla gráfica de 160 x 160 píxeles, los resultados de las mediciones en tiempo real y al mismo tiempo los registra en su memoria interna y los organiza en forma de archivos. Estos registros incluyen valores medios, máximos y mínimos de tensiones, corrientes y potencias, formas de onda, energía acumulada, perturbaciones, etc.

El manejo del Circutor AR5 se puede ver en el Anexo D así como también el manejo del programa **Power Vision 1.5** el cual muestra los datos registrados por el Analizador y se puede tener acceso a las tablas y gráficas, las cuales se analizarán en el siguiente capítulo. Los datos tomados por el Analizador se pueden llevar a una hoja de cálculo ya que estos vienen en un formato plano .txt que puede ser pegado. En el Anexo D también se pueden apreciar las características técnicas del equipo como son: Medida de tensión, medida de intensidad, clase de precisión, características constructivas, normas que cumple el equipo y los accesorios.

Figura 7. Analizador de redes Circutor AR5.



4. ANALISIS DE LOS DATOS REGISTRADOS

Debido a la gran aceptación que ha tenido el alumbrado fluorescente ya sea en aplicaciones industriales o comerciales, éste tipo de iluminación es una fuente significativa de polución en la calidad de la potencia. Los balastos que controlan la operación de las bombillas fluorescentes son generadores de picos de corrientes y también son culpables de introducir corrientes armónicas en la red de distribución.

En la Universidad de la Salle sede centro están siendo utilizados los dos tipos de balastos, que son los electromagnéticos y los electrónicos para el alumbrado de la gran mayoría de las áreas de la Universidad con bombillas fluorescentes, ya que son muy contados los sitios de la Universidad que no utilizan este tipo de iluminación como son los parqueaderos, el teatro, algunos pasillos y la iglesia.

El proyecto como tal busca evaluar la polución generada por los balastos electrónicos pero como se ha visto, la Universidad todavía tiene circuitos donde mezcla balastos electromagnéticos y electrónicos, los cuales también se van a analizar.

En este capítulo se hace un análisis de los datos obtenidos en las mediciones. Por cada tablero se presentarán las gráficas de los valores obtenidos en las mediciones, las cuales serán: La corriente de las tres fases, la tensión de las tres fases, el factor de potencia, la frecuencia, la potencia activa, el porcentaje de distorsión armónica total para la corriente y la tensión de las tres fases, los contenidos armónicos individuales y el porcentaje de dirección de corrientes armónicas.

4.1 CAFETERIA

Este tablero alimenta 68 luminarias las cuales tienen balastos electrónicos y electromagnéticos mezclados entre los circuitos del tablero, esta compuesto por: 5 de 2x59W, 25 de 2x32W, 15 de 2x17W, 7 de 2x75W, 2 de 2x40W y 14 de 2 x 20W. Este tablero contiene circuitos de iluminación para la cafetería, el corredor que queda en frente de ésta y la entrada de las escaleras del bloque C.

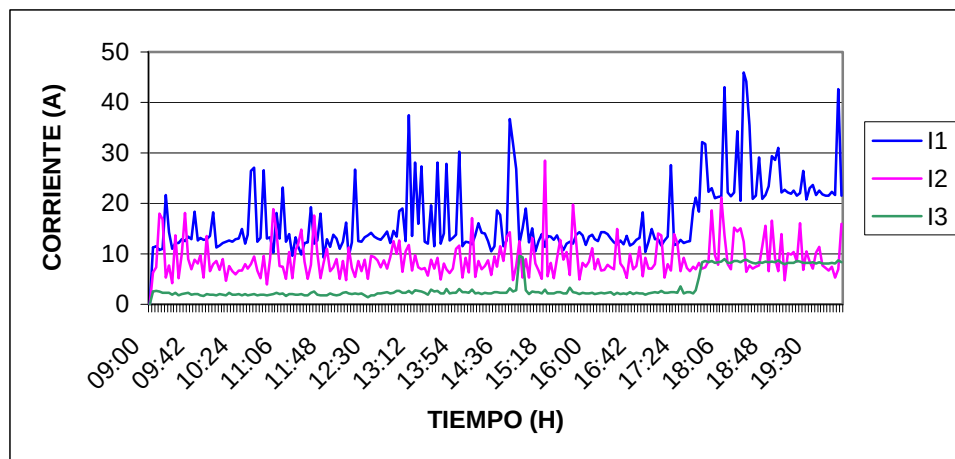
4.1.1 Comportamiento de la corriente. En la gráfica 1 se puede observar el comportamiento de las tres fases de corriente del tablero de la cafetería.

La primera fase de este tablero tiene un consumo de corriente que varía de 10 a 17.5 A en las horas de la mañana, lo cual es muy normal ya que ésta fase no se encuentra sobrecargada. En las horas de la tarde el consumo varía poco con respecto a las horas de la mañana. En las horas de la noche, como era de esperarse, el consumo se eleva casi en un 50% y ya varía entre los 22 a los 30 A.

El comportamiento de la segunda fase de este tablero, también en la gráfica 1, se ve que tiene una variación constante entre los 7 y los 10 A.

El comportamiento de la tercera fase se observa también en la gráfica 1. Aquí se puede apreciar que la corriente no es muy variable ya que muestra un pico de corriente a la misma hora que en el de la segunda fase pero de menor valor: 9 A. A partir de las 6 de la tarde esta fase entra en acción y tiene un comportamiento constante de 8 amperios.

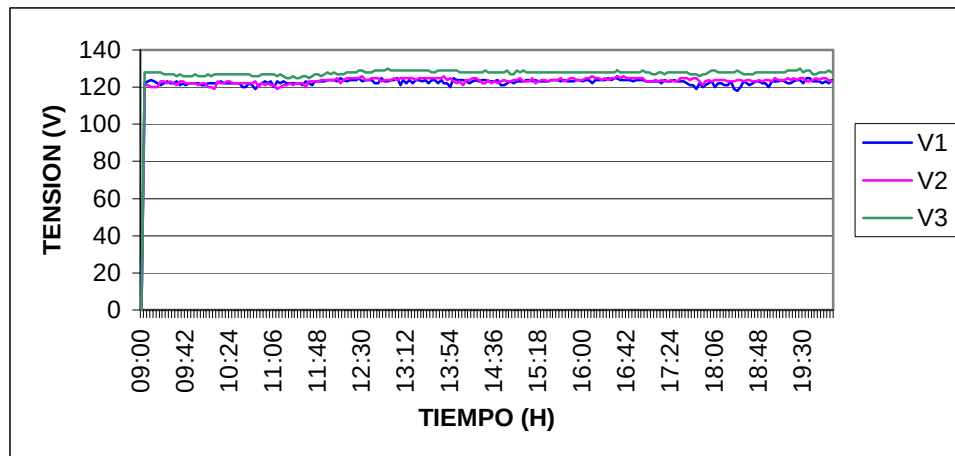
Gráfica 1. Curvas de carga por fase en el tablero de la cafetería.



4.1.2 Comportamiento de la tensión. En la gráfica 2 se puede observar la variación de la tensión de las tres fases del tablero de la cafetería.

Como se puede apreciar el comportamiento de la tensión de las tres fases tiene una variación dentro de los límites del 10%¹² ya que tiene un mínimo de 120 V y un máximo de 129 V.

Gráfica 2. Curva de tensión por fase en el tablero de la cafetería.

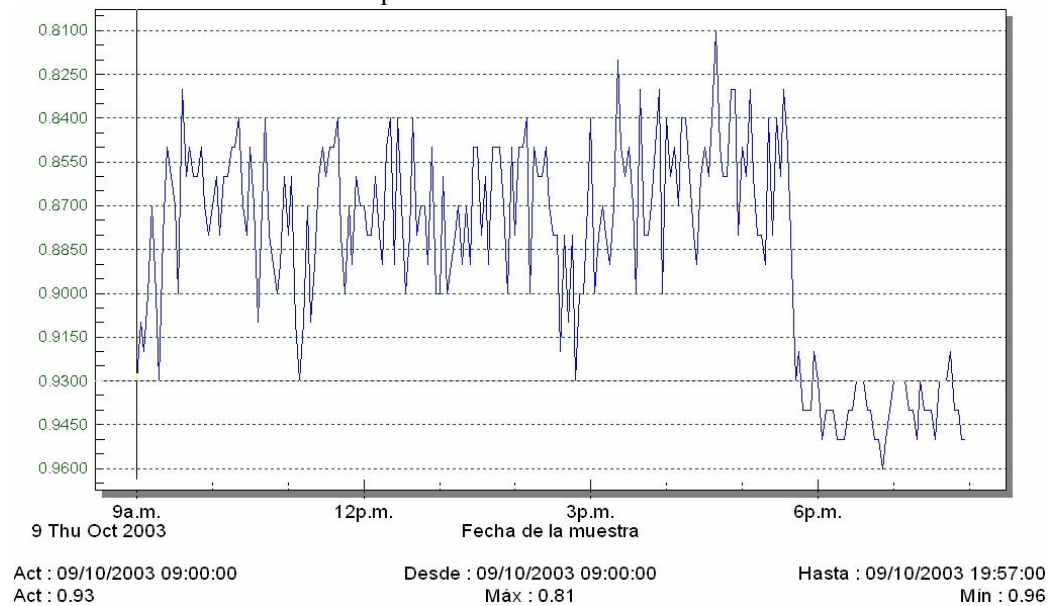


4.1.3 Comportamiento del factor de potencia. En la gráfica 3 se observa el comportamiento del factor de potencia con respecto al tiempo, esta gráfica muestra que el factor de potencia tiene una variación constante entre 0.80 y 0.93 en las horas de la mañana y de la tarde. A partir de las 6 de la tarde sube a 0.92 y se mantiene variando entre éste valor y 0.96.

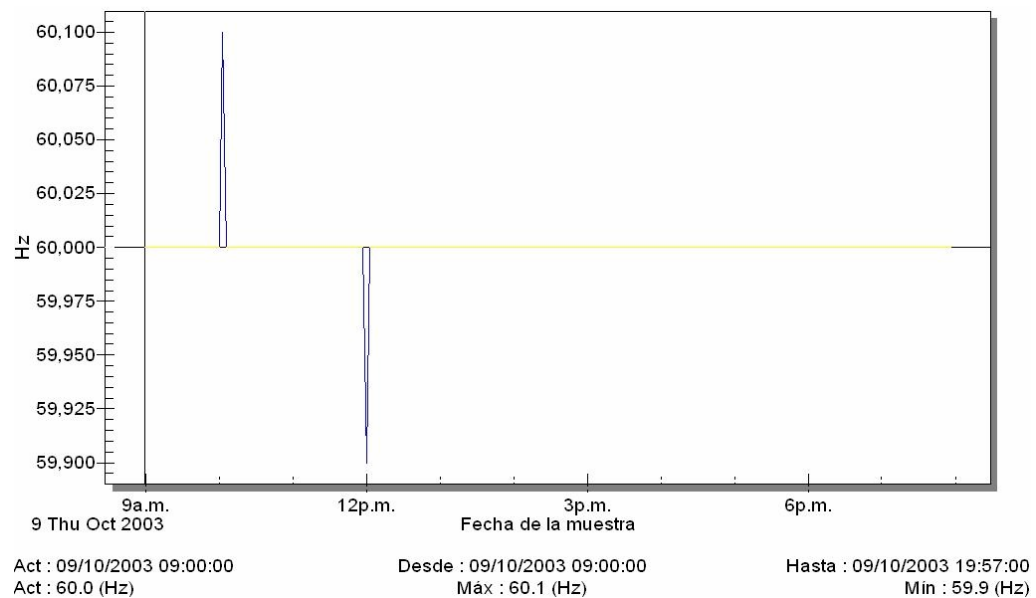
4.1.4 Comportamiento de la frecuencia. En la gráfica 4 se observa el comportamiento de la frecuencia con respecto al tiempo del tablero de la cafetería. En ella se puede ver que la mayor parte del tiempo permanece constante en 60 Hz teniendo unos pequeños picos de 0.1 en las horas de la mañana, lo cual no es muy significativo.

¹² VERDERBER RUDOLPH., "Performance of electronic ballasts and controls with fluorescents lamps". IEEE 1989.

Gráfica 3. Curva del factor de potencia en el tablero de la cafetería.



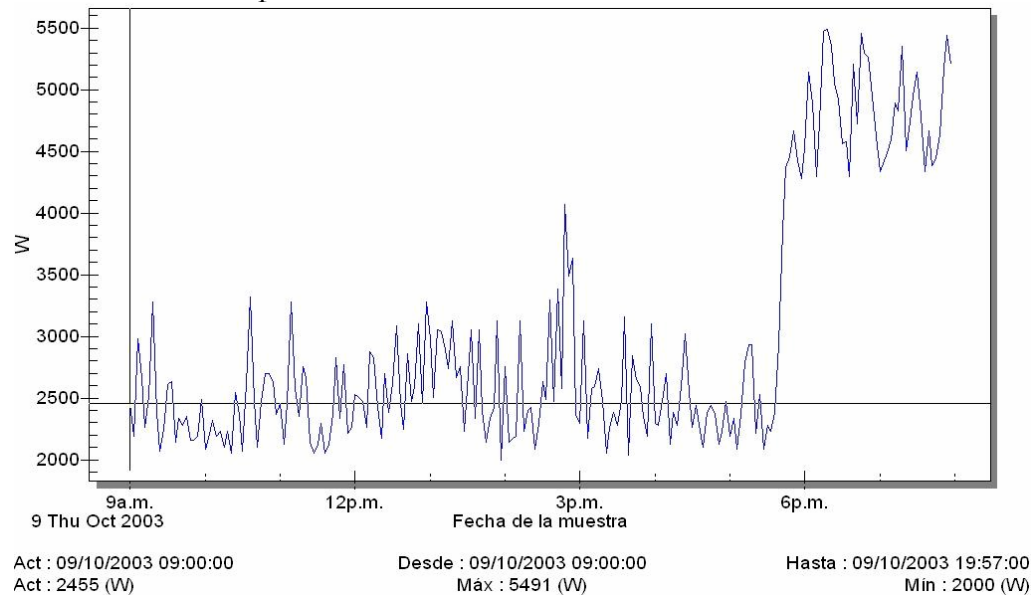
Gráfica 4. Curva de la frecuencia en el tablero de la cafetería.



4.1.5 Comportamiento de la potencia activa. En la gráfica 5 se puede observar la variación de la potencia activa del tablero de la cafetería con respecto al tiempo. La gráfica muestra la potencia activa consumida por la iluminación. Aquí se ve que desde las horas de la mañana hasta las seis de la tarde permanece

una variación constante entre los 2 kW a los 4 kW y en las horas de la noche la potencia sube a los 4.5 kW y varía entre éste valor y 5.5 kW. Esto se debe a que en las horas de la noche, como era de esperarse, el consumo de la iluminación aumenta casi al doble.

Gráfica 5. Curva de la potencia activa en el tablero de la cafetería.



4.1.6 Comportamiento de la distorsión armónica total. En las tres siguientes gráficas se podrá observar el comportamiento de los THD de corriente y de tensión para el tablero de la cafetería.

La gráfica 6 representa la distorsión armónica total tanto de corriente como de tensión para la primera fase del tablero de la cafetería. En ella se puede ver que el mayor porcentaje de distorsión para la tensión es del 3.6 %, lo cual cumple con la norma **IEEE 519-92**¹³, esta norma recomienda que la tensión de distorsión en un punto común de unión no sobrepase el 5%. La misma apreciación se hace para la segunda y tercera fase de este tablero en las gráficas 7 y 8 respectivamente. Aquí se puede ver que el mayor porcentaje de distorsión de tensión para la segunda fase es de 3 % y para la tercera fase es de 3.4% lo cual cumple también con la norma. En las mismas gráficas también se puede observar el porcentaje de distorsión total de corriente que para la primera fase tiene un valor máximo de

¹³ MELHORN C, J. "Effect of high efficiency lighting on power quality in public buildings". 1995 IEEE.

38.4%, para la segunda de 59% y para la tercera de 71.4%. Observando que la mayor contaminación la presenta la tercera fase ya que sus valores son mucho más grandes que para las dos primeras fases.

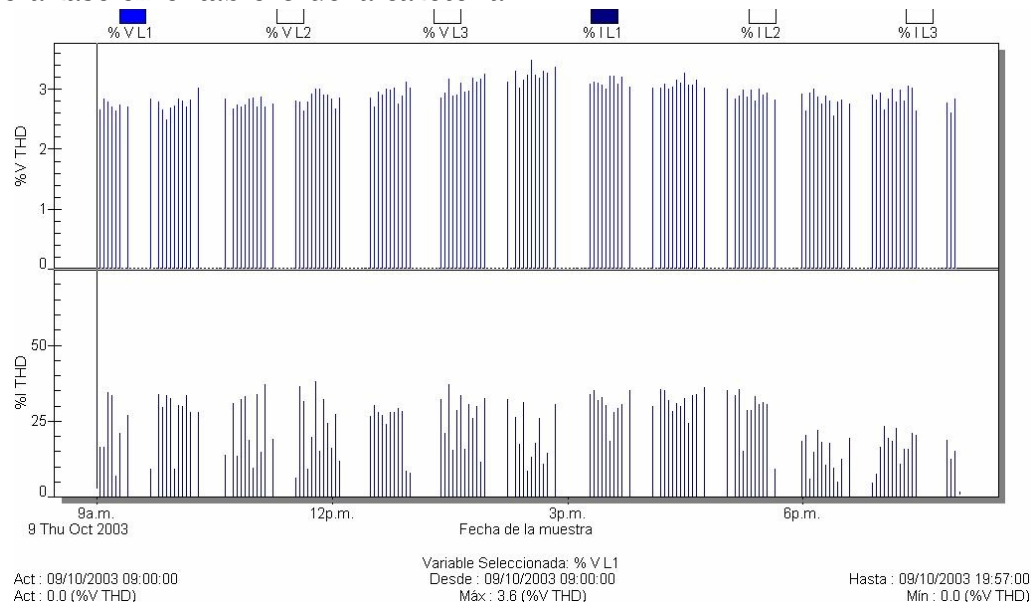
Tabla 8. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero de la cafetería.

TENSION	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	2,5	1,8	2,3
Promedio	2,9224	2,2721	2,8699
Máximo	3,6	3	3,4
Desv.Estand	0,1975	0,2018	0,2468

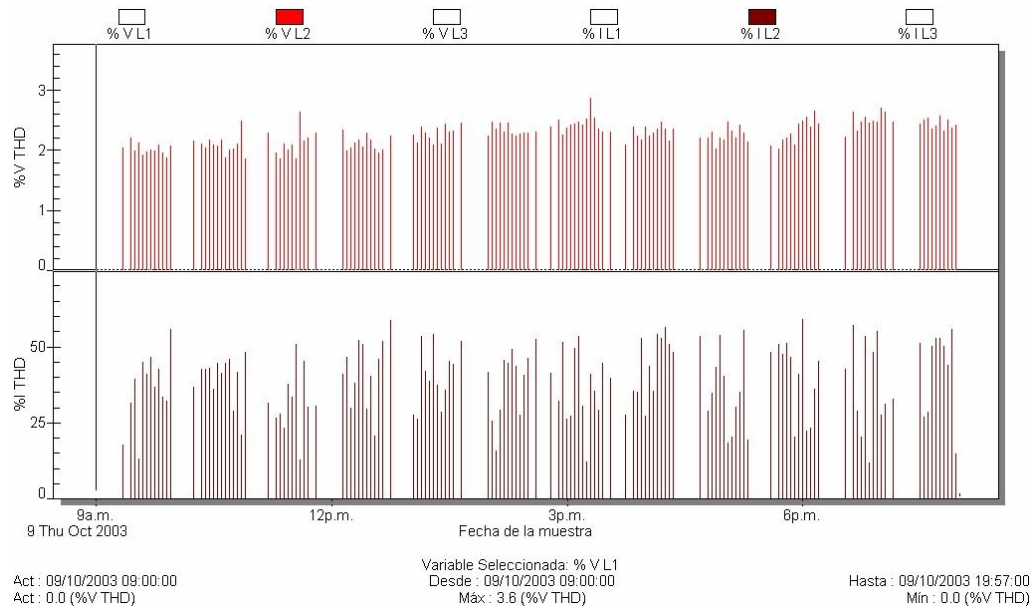
Tabla 9. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero de la cafetería.

CORRIENTE	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	4,6	5,9	12
Promedio	24,2836	37,8516	49,4977
Máximo	38,4	59	71,4
Desv.Estand	8,8250	12,4495	17,4772

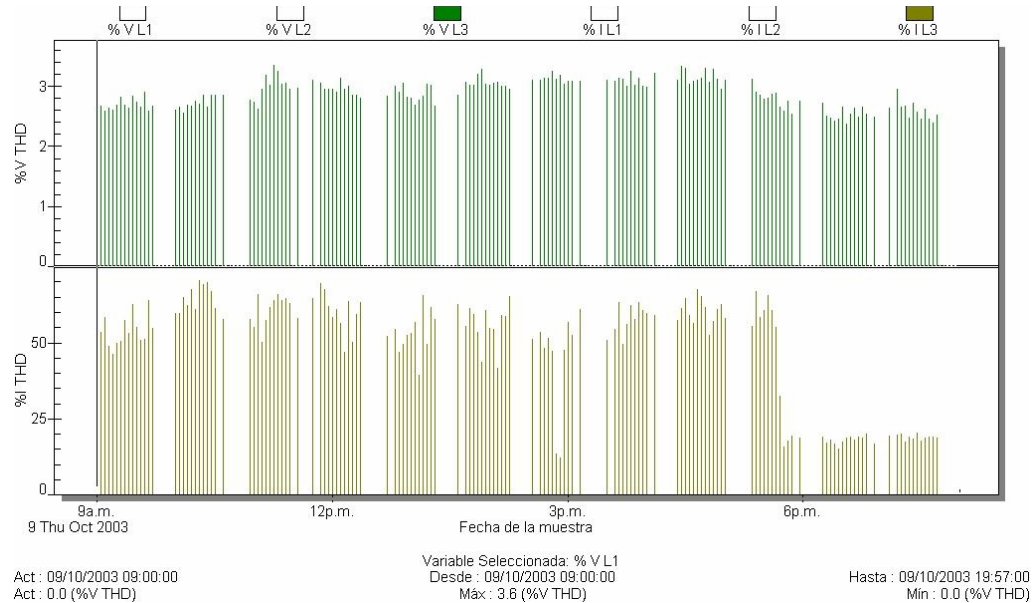
Gráfica 6. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero de la cafetería.



Gráfica 7. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero de la cafetería.



Gráfica 8. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en el tablero de la cafetería.



4.1.7 Caracterización del contenido armónico individual. Como el proyecto pretende hacer una evaluación más enfocada hacia la parte armónica y las mediciones se han hecho en partes específicas dentro de la Universidad, entonces

aquí se aplica la norma **IEC** mencionada en el primer capítulo de este proyecto, la cual clasifica a las cargas de iluminación como clase C, luego se hará una comparación entre los valores obtenidos en las mediciones y la tabla 6 de dicho capítulo para saber si cumplen con la norma.

En las siguientes tablas se presenta un análisis estadístico por fase de los armónicos individuales. En la tabla 10 se puede apreciar que todos los valores máximos sobrepasan los límites establecidos por la norma **IEC**, así como también algunos valores promedios pertenecientes al 5 y al 11 armónico. El número de datos que sobrepasan los límites se pueden apreciar en la columna 6, en las columnas 7 y 8 se ve el número de datos según su ubicación en los cuadrantes así si hay mayor número de datos en los cuadrantes I y IV se dice que están entrando a la instalación y si hay mayor número de datos en los cuadrantes II y III se dice que están saliendo, lo cual no es saludable ya que esto es lo que origina contaminación hacia el sistema de distribución.

En las tablas 11 y 12 se presenta el análisis para las dos siguientes fases, en ellas se puede apreciar nuevamente que los valores máximos sobrepasan los límites de la norma de manera desmedida y no la cumplen. En la columna del promedio se puede ver que el único valor que cumple con la norma es el de el 2 armónico, también se puede apreciar que la fase 3 es la mayor contaminante de todas. El número de datos fuera de los límites es muy grande ya que como se puede apreciar, la mayoría de los datos supera más de la mitad, observando que el armónico 5 de la tercera fase sólo 9 de datos de los 220 cumplen con la norma. Por último, el porcentaje de datos ubicados en los cuadrantes II y III es mayor en los armónicos 3, 5, 9 y 11 para la primera fase, el 5 y 11 para la segunda fase y para la tercera el 3 y el 9.

Tabla 10. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero de la cafetería.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,059	0,506	2,795	0,369	2	2	58,64	41,36
3	3,429	19,957	33,147	7,956	30	17	45,91	54,09
5	0,438	11,027	22,463	4,868	10	145	15,45	84,55
7	0,82	6,209	15,673	3,088	7	84	67,27	32,73
9	0,44	3,560	10,865	2,001	5	54	46,82	53,18
11	0,128	3,092	7,611	1,727	3	110	48,64	51,36

Tabla 11. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero de la cafetería.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,031	0,794	5,771	0,634	2	12	60,91	39,09
3	0,622	26,890	44,981	12,042	30	123	53,18	46,82
5	1,327	21,960	44,224	10,986	10	184	18,64	81,36
7	1,298	13,258	27,959	6,745	7	179	54,09	45,91
9	0,454	8,947	21,814	4,922	5	166	68,64	31,36
11	0,37	6,306	14,409	3,431	3	177	42,27	57,73

Tabla 12. Análisis individual de corriente para la fase 3 en el tablero de la cafetería.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,069	1,702	7,057	1,312	2	65	48,64	51,36
3	8,232	41,912	63,844	17,278	30	170	27,27	72,73
5	3,219	31,505	50,638	12,071	10	211	55,00	45,00
7	4,587	22,597	43,937	9,888	7	195	65,91	34,09
9	2,143	14,739	32,814	7,274	5	173	28,18	71,82
11	1,014	8,653	24,947	5,213	3	186	63,18	36,82

Para los siguientes tableros se realizará el mismo procedimiento que para el tablero de la cafetería, dejando este como referencia para los demás.

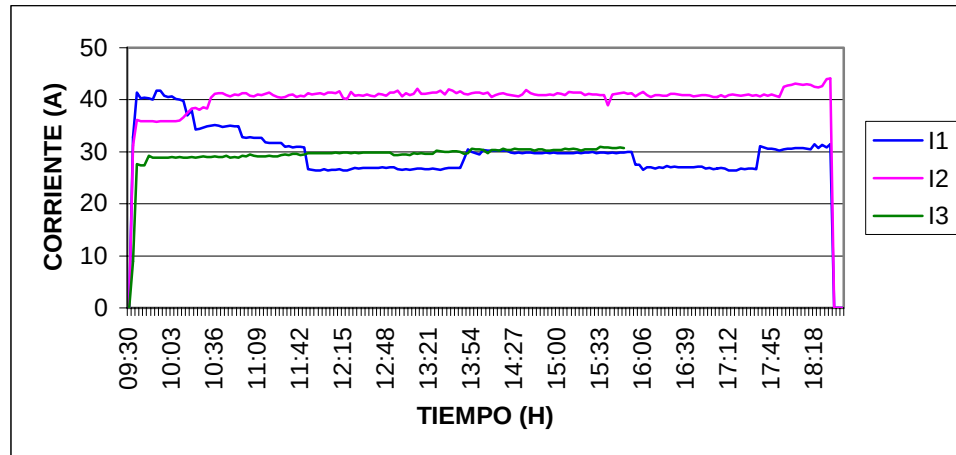
4.2 SALA DE EXPOSICION

El tablero de la sala de exposición es el encargado de alimentar 55 bombillas fluorescentes de 2 por 17 W, las cuales sólo tiene balastos electrónicos. En el momento de la medición se estaba realizando la feria de la Universidad de la salle (ExpoSalle) y por pedido del Ingeniero y del Director de la oficina de servicios generales las mediciones con el analizador de redes fueron tomadas en este periodo para su posterior análisis.

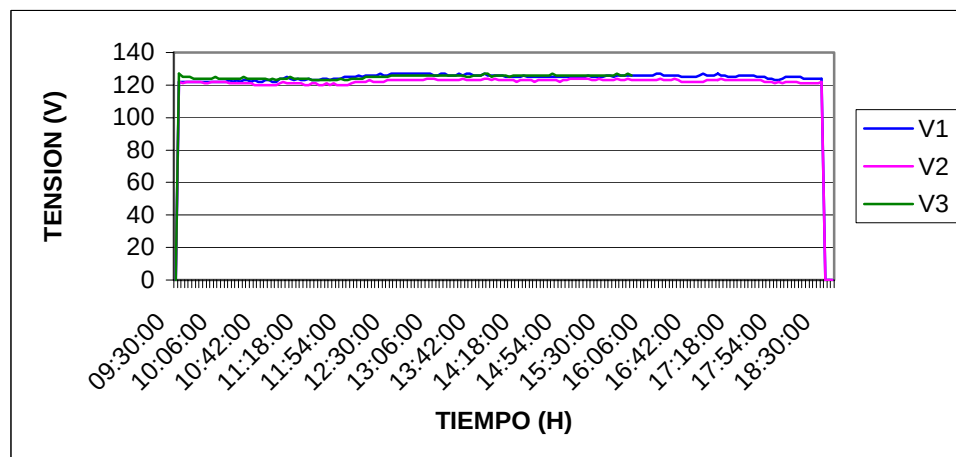
4.2.1 Comportamiento de la corriente. En la gráfica 9 se puede apreciar la curva de carga por fase del tablero que alimenta la sala de exposición.

4.2.2 Comportamiento de la tensión. En la gráfica 10 se puede observar la variación de la tensión por fase del tablero de la sala de exposición.

Gráfica 9. Curvas de carga por fase en el tablero de la sala de exposición.



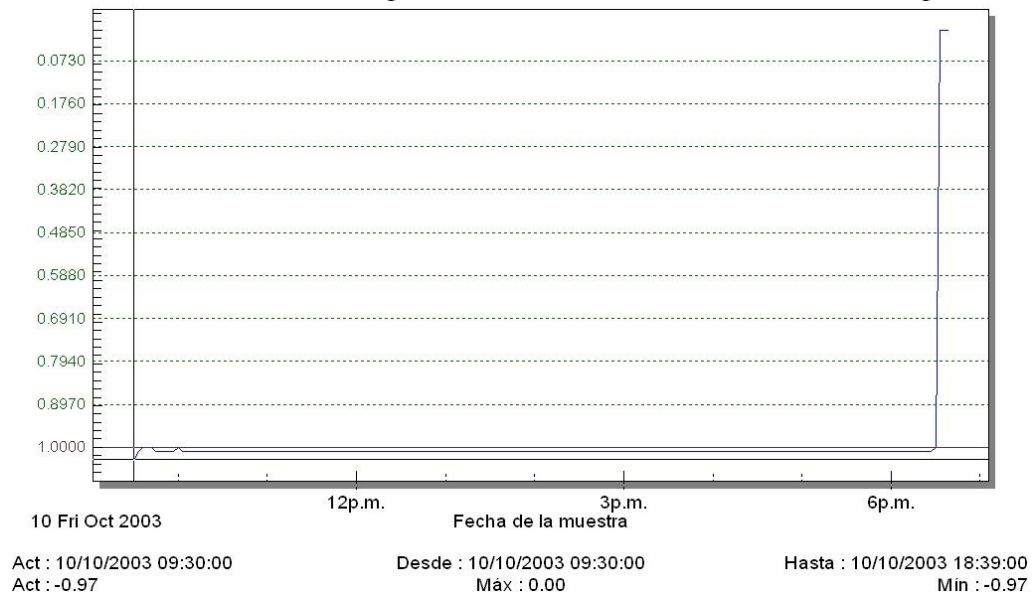
Gráfica 10. Curva de tensión por fase en el tablero de la sala de exposición.



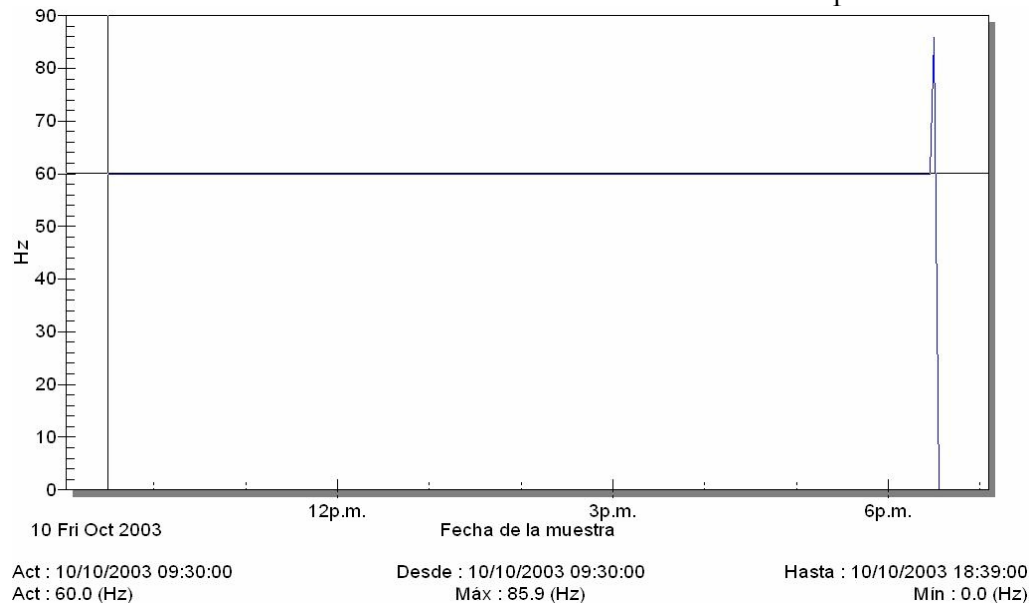
4.2.3 Comportamiento del factor de potencia. En la gráfica 11 se observa el comportamiento del factor de potencia con respecto al tiempo. Esta gráfica muestra que el factor de potencia permanece constante en casi la unidad 0.97.

4.2.4 Comportamiento de la frecuencia. En la gráfica 12 se observa la frecuencia con respecto al tiempo del tablero de la sala de exposición. En ella se puede ver que la mayor parte del tiempo permanece constante en 60 Hz.

Gráfica 11. Curva del factor de potencia en el tablero de la sala de exposición.

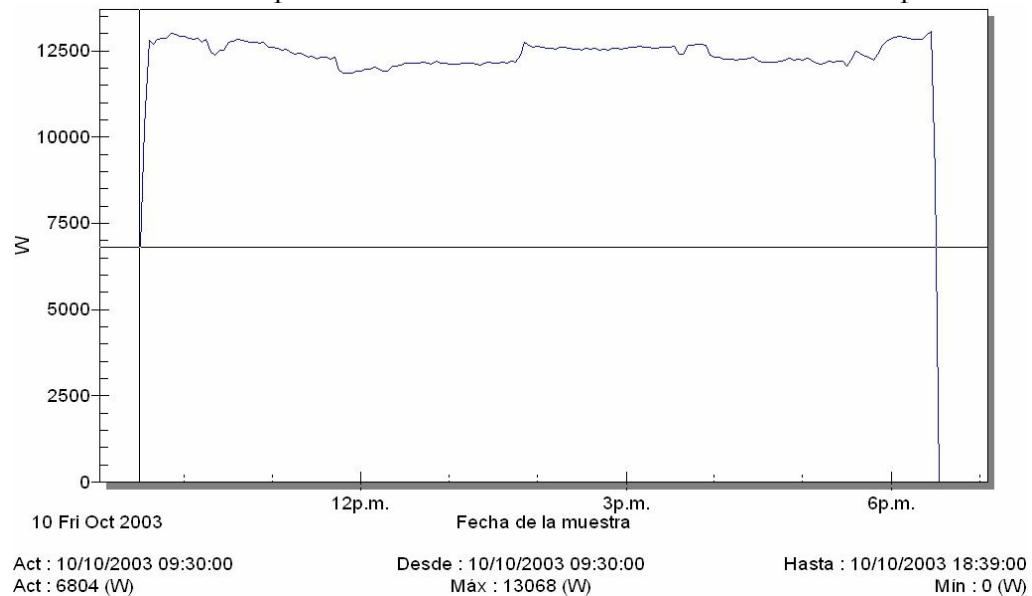


Gráfica 12. Curva de la frecuencia en el tablero de la sala de exposición.



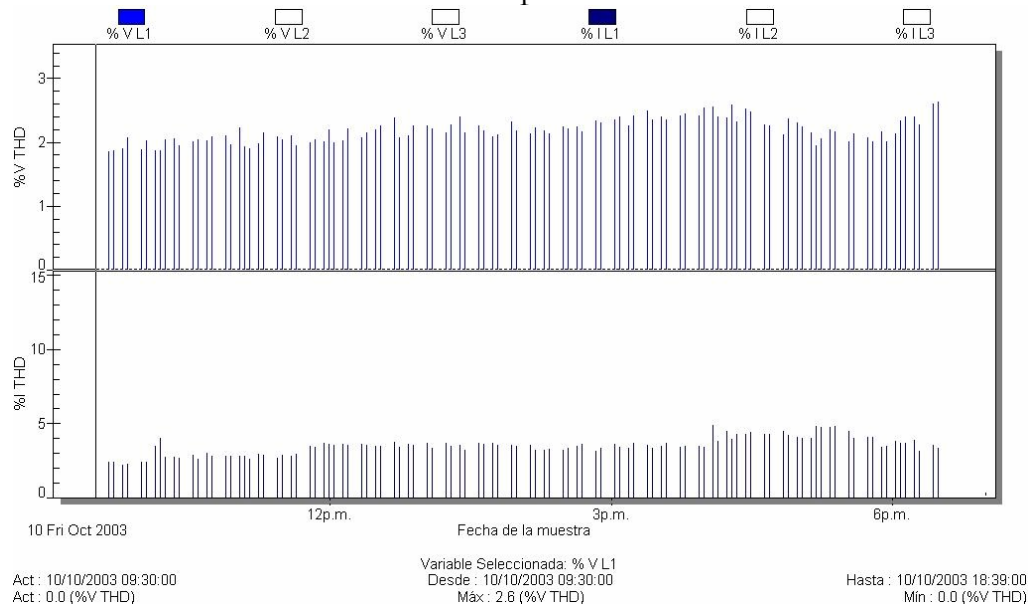
4.2.5 Comportamiento de la potencia activa. En la gráfica 13 se puede observar la variación de la potencia activa del tablero de la sala de exposición con respecto al tiempo.

Gráfica 13. Curva de la potencia activa en el tablero de la sala de exposición.

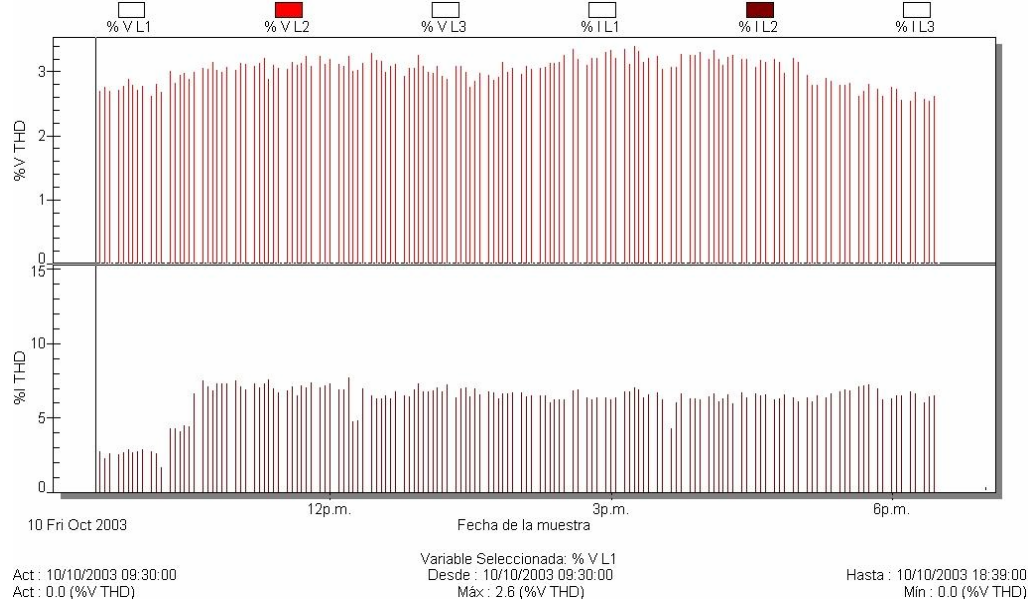


4.2.6 Comportamiento de la distorsión armónica total. En las tres siguientes gráficas se podrá observar el comportamiento de los THD de corriente y de tensión para el tablero de la sala de exposición.

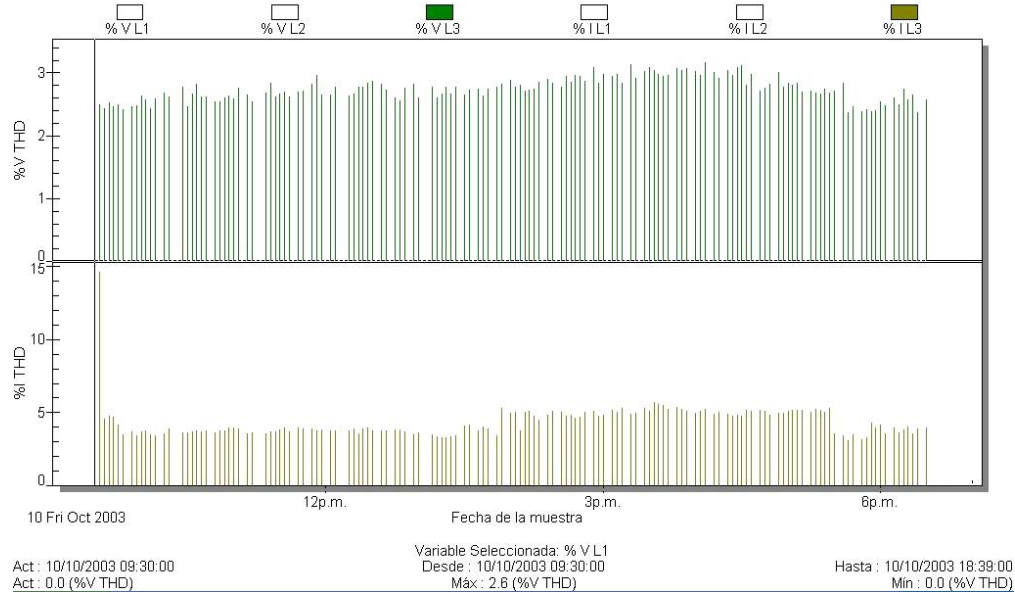
Gráfica 14. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero de la sala de exposición.



Gráfica 15. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero de la sala de exposición.



Gráfica 16. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en el tablero de la sala de exposición.



4.2.7 Caracterización del contenido armónico individual. En las siguientes tablas se presenta el análisis individual y total del contenido armónico del la sala de exposición.

Tabla 13. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero de la sala de exposición.

TENSION	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	1,8	2,5	2,4
Promedio	2,1811	3,0089	2,7394
Máximo	2,6	3,4	3,1
Desv.Estand	0,1790	0,2023	0,1719

Tabla 14. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero de la sala de exposición.

CORRIENTE	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	2,2	1,7	3,3
Promedio	3,4722	6,2328	4,2449
Máximo	4,9	7,7	14,6
Desv.Estand	0,5650	1,2374	1,1302

Tabla 15. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero de la sala de exposición.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,024	0,353	1,007	0,241	2	0	42,77	57,23
3	0,851	2,408	4,810	0,966	30	0	93,33	6,67
5	0,138	1,797	2,898	0,632	10	0	96,11	3,89
7	0,086	1,020	1,881	0,414	7	0	7,22	92,78
9	0,107	0,391	1,020	0,176	5	0	47,22	52,78
11	0,016	0,171	0,474	0,083	3	0	63,33	36,67

Tabla 16. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero de la sala de exposición.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,008	0,166	0,595	0,098	2	0	45,55	54,45
3	1,475	5,123	6,675	1,106	30	0	7,77	92,23
5	0,190	2,907	4,035	0,655	10	0	92,22	7,78
7	0,494	1,677	2,260	0,339	7	0	7,22	92,78
9	0,028	0,227	0,595	0,117	5	0	73,88	26,12
11	0,060	0,688	1,103	0,196	3	0	94,44	5,56

Tabla 17. Análisis individual de corriente para la fase 3 en el tablero de la sala de exposición.

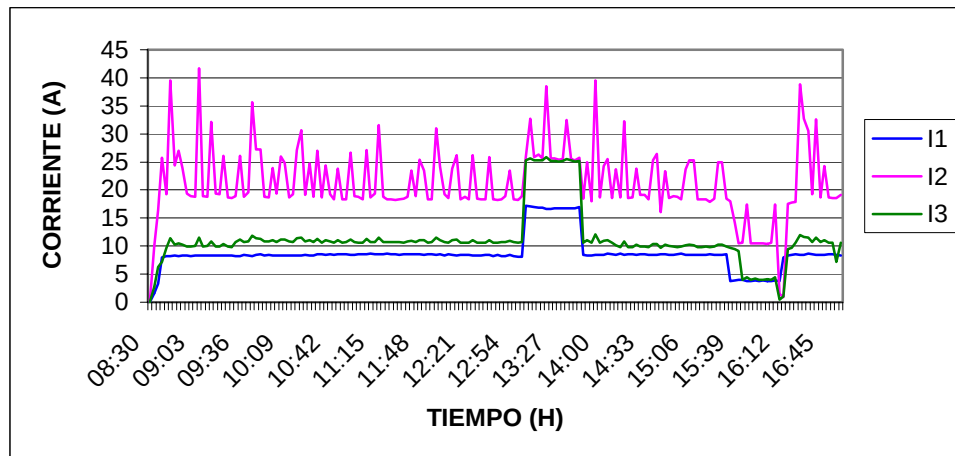
Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,011	0,146	0,522	0,083	2	0	45,55	54,45
3	1,188	2,534	14,276	1,303	30	0	36,11	63,89
5	0,307	2,793	3,675	0,497	10	0	97,77	2,23
7	0,255	1,529	2,074	0,296	7	0	31,11	68,89
9	0,007	0,235	0,635	0,111	5	0	72,22	27,78
11	0,153	0,458	0,848	0,134	3	0	97,77	2,23

4.3 TABLERO TA7

El tablero alimenta 68 bombillas fluorescentes 8 de 2 por 17 W, 30 de 2 por 32 W y 30 de 2 por 59 W de 96” de largo, las cuales todas utilizan balasto electrónico. Este tablero ilumina las aulas del piso séptimo del bloque A, los corredores y las escaleras debido a también es el encargado de alimentar los reflectores que iluminan el parqueadero las mediciones se realizaron hasta las seis de la tarde, hora en que son encendidos.

4.3.1 Comportamiento de la corriente. En la gráfica 17 se puede apreciar la curva de carga por fase del tablero TA7.

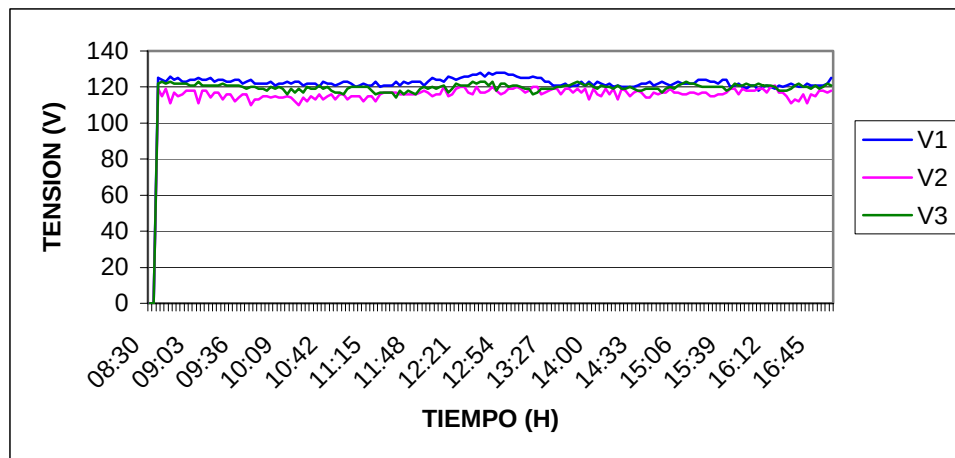
Gráfica 17. Curvas de carga por fase en el tablero TA7.



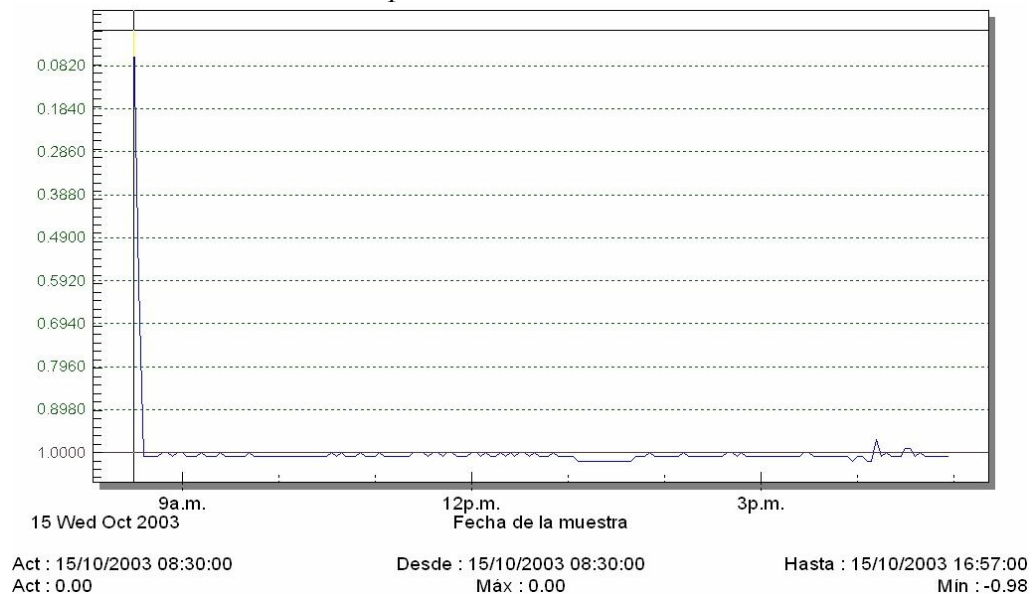
4.3.2 Comportamiento de la tensión. En la gráfica 18 se puede observar la variación de la tensión por fase del tablero TA7.

4.3.3 Comportamiento del factor de potencia. En la gráfica 19 se observa el comportamiento del factor de potencia con respecto al tiempo, esta gráfica muestra que el factor de potencia varía cerca de la unidad cumpliendo con la norma de estar por encima de 0.90.

Gráfica 18. Curvas de tensión por fase en el tablero TA7.



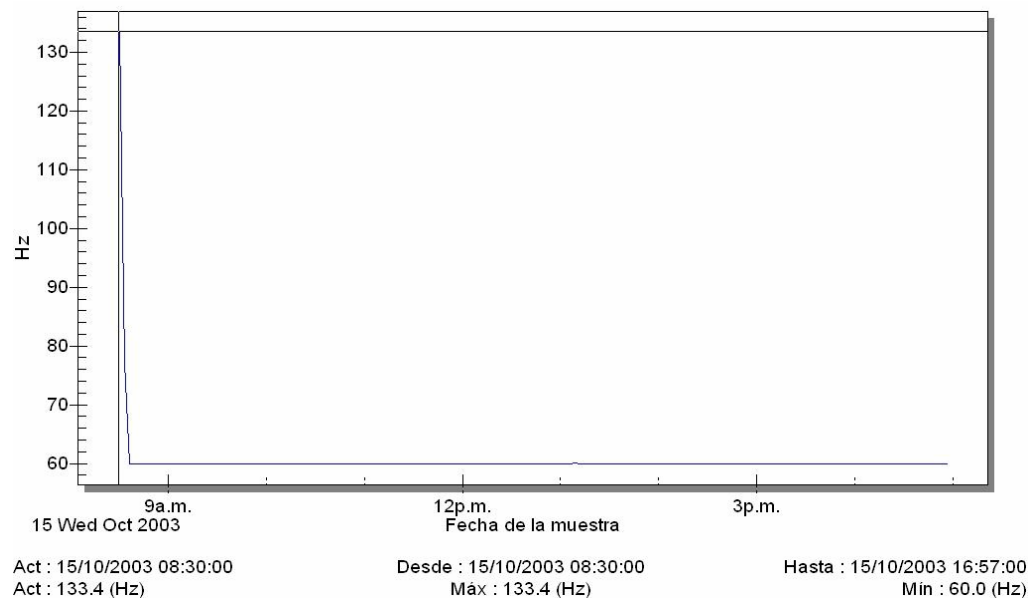
Gráfica 19. Curva del factor de potencia en el tablero TA7.



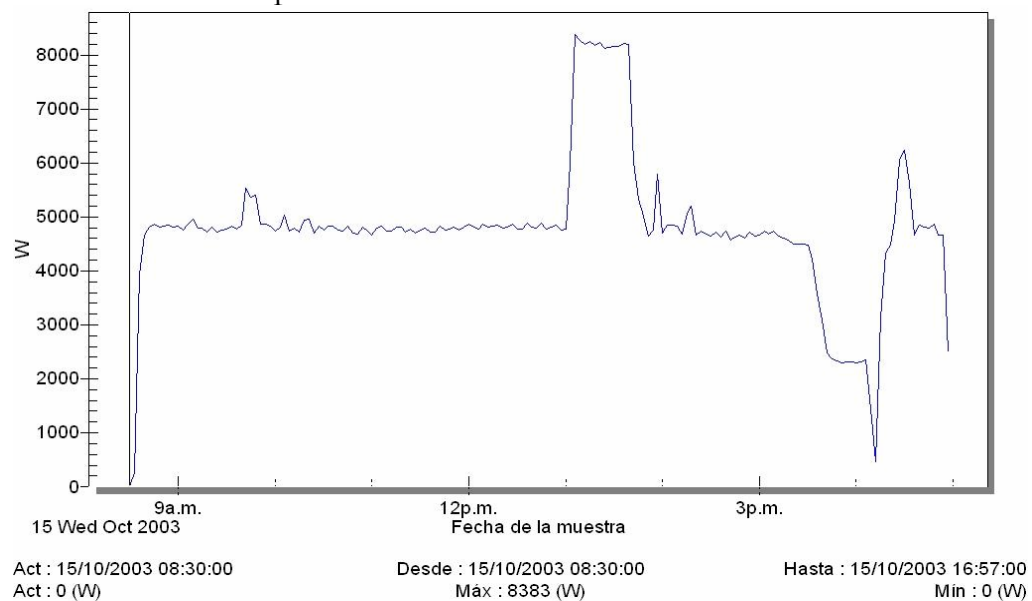
4.3.4 Comportamiento de la frecuencia. En la gráfica 20 se observa la frecuencia con respecto al tiempo del tablero TA7. En ella se puede ver que la mayor parte del tiempo permanece constante a 60 Hz.

4.3.5 Gráfica de potencia activa. En la gráfica 21 se puede observar la variación de la potencia activa del tablero TA7 con respecto al tiempo.

Gráfica 20. Curva de la frecuencia en el tablero TA7.

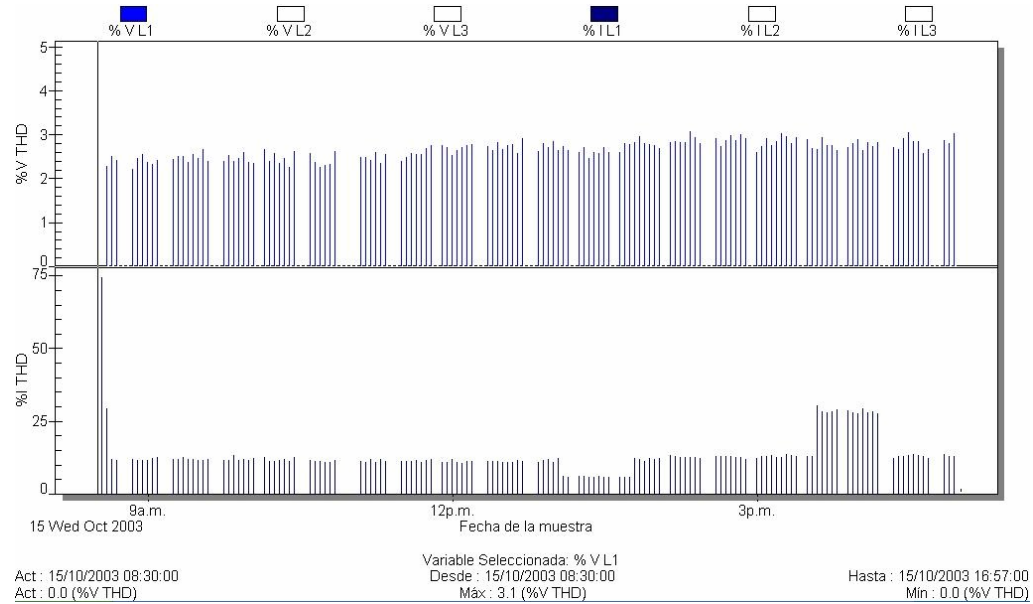


Gráfica 21. Curva de la potencia activa en el tablero TA7.

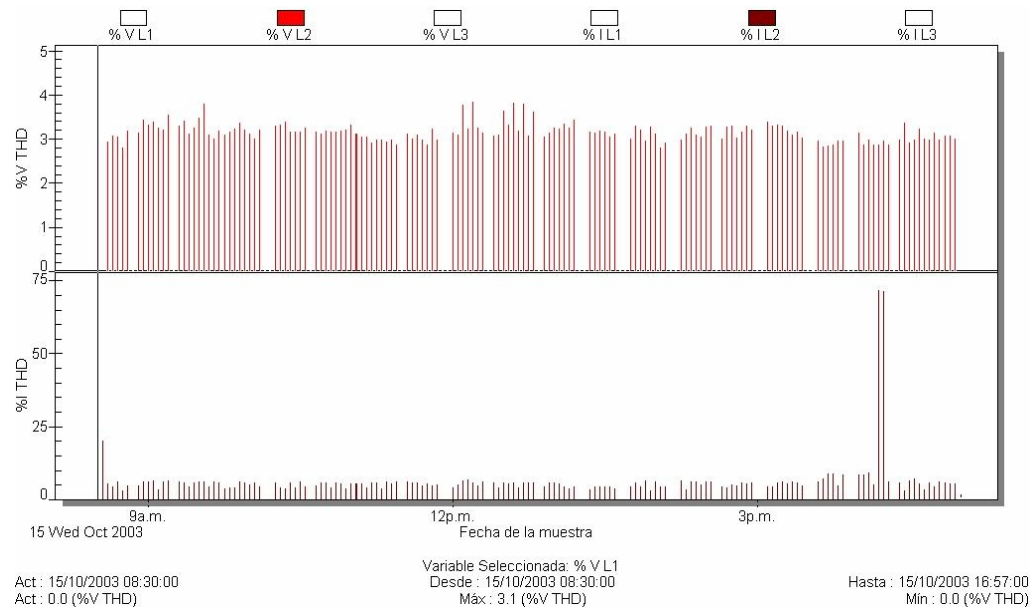


4.3.6 Comportamiento de la distorsión armónica total. En las tres siguientes gráficas se podrá observar el comportamiento de los THD's de corriente y de tensión para el tablero TA7.

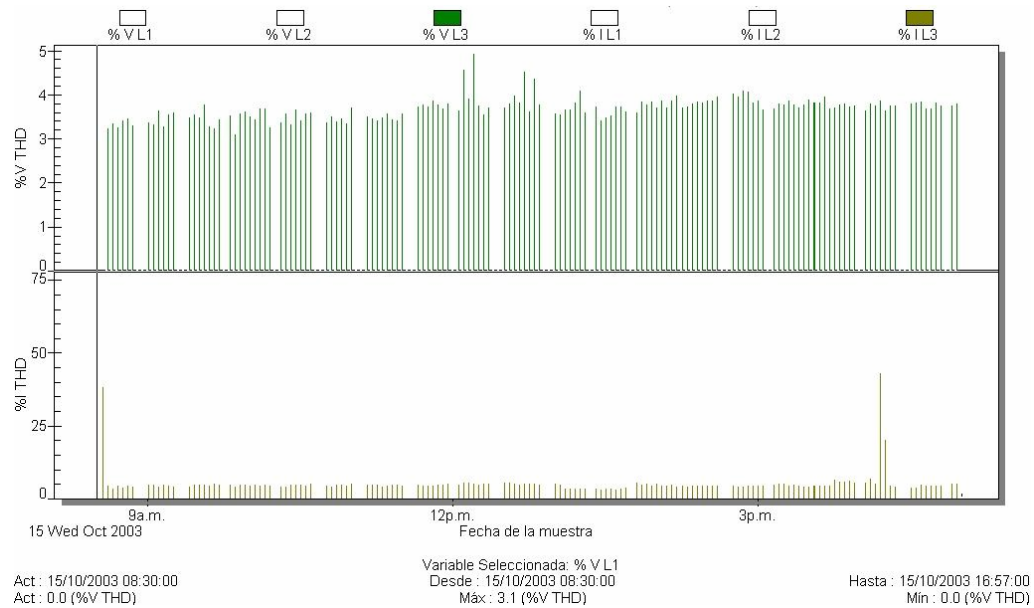
Gráfica 22. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero TA7.



Gráfica 23. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero TA7.



Gráfica 24. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en el tablero TA7.



4.3.7 Caracterización del contenido armónico individual. En las siguientes tablas se presenta el análisis individual y total del contenido armónico del tablero TA7.

Tabla 18. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero TA7.

TENSION	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	0	0	0
Promedio	2,6361	3,1438	3,6604
Máximo	3,1	3,8	4,9
Desv.Estand	0,2853	0,3120	0,3763

Tabla 19. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero TA7.

CORRIENTE	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	5,7	3,1	3,1
Promedio	13,2864	6,2858	5,1077
Máximo	74,3	71,7	43,1
Desv.Estand	6,9156	7,3303	4,1347

Tabla 20. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero TA7.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,005	0,383	2,125	0,290	2	1	53,25	46,75
3	4,401	9,983	31,940	4,043	30	1	0,00	100,00
5	1,300	5,226	19,535	3,476	10	15	99,40	0,60
7	2,407	4,978	12,129	1,923	7	15	8,87	91,13
9	1,470	3,774	16,119	1,523	5	15	91,71	8,29
11	0,159	1,215	24,927	1,915	3	2	28,40	71,60

Tabla 21. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero TA7.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,034	0,577	16,523	1,796	2	3	79,28	20,72
3	1,552	4,246	62,971	6,276	30	2	95,85	4,15
5	0,723	3,630	44,933	4,222	10	2	16,56	83,44
7	0,339	1,514	40,260	4,205	7	2	0,59	99,41
9	0,470	1,748	37,925	3,908	5	2	99,40	0,60
11	0,467	1,497	29,944	2,949	3	2	1,77	98,23

Tabla 22. Análisis individual de corriente para la fase 3 en el tablero TA7.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,032	0,483	32,713	2,504	2	1	49,11	50,89
3	0,071	1,634	33,146	3,013	30	1	97,63	2,37
5	2,379	3,938	23,178	1,610	10	1	1,77	98,23
7	0,542	1,234	13,283	1,078	7	1	71,59	28,41
9	0,097	0,664	9,713	0,835	5	1	98,81	1,19
11	0,066	0,483	5,803	0,518	3	2	93,49	6,51

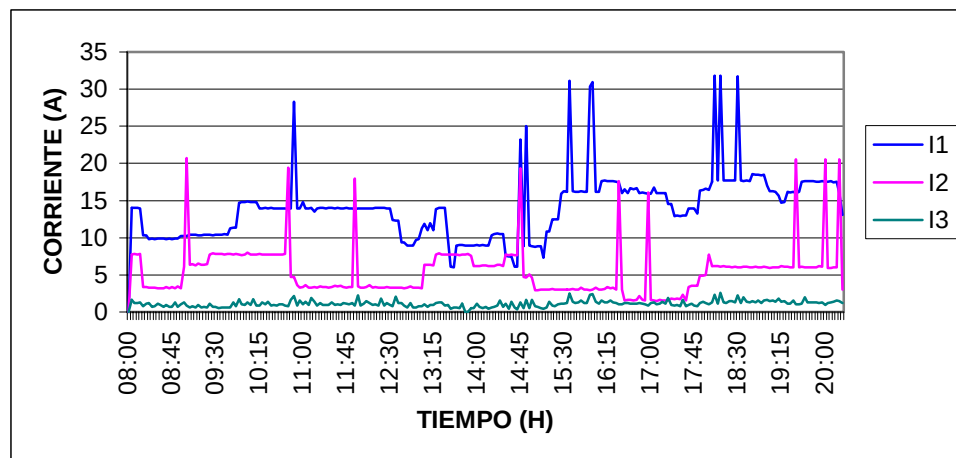
4.4 TABLERO TD6

El tablero TD6 queda ubicado en piso sexto del bloque D, es el encargado de alimentar las bombillas fluorescentes de los salones, baños, corredor y escaleras. En total alimenta 52 bombillas fluorescentes que utilizan balasto electrónico: 41 de 2 por 32 W, 2 de 2 por 17 W y 9 de 4 por 17 W.

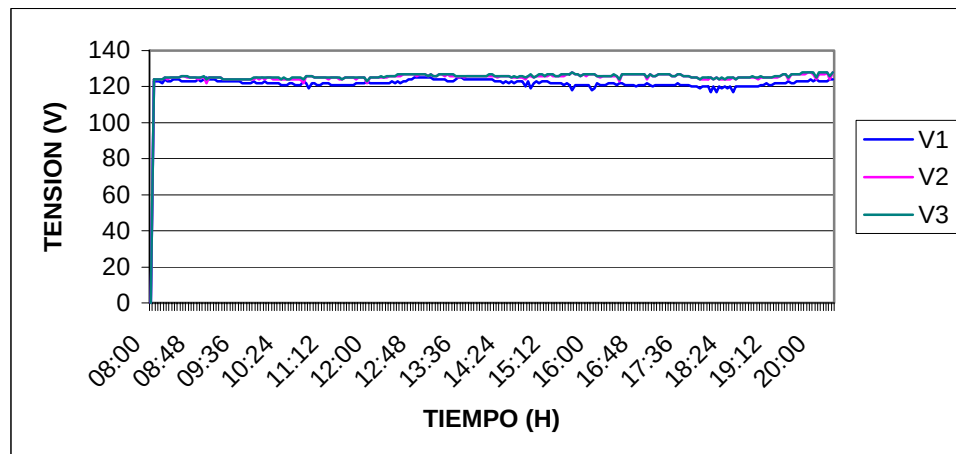
4.4.1 Comportamiento de la corriente. En la gráfica 25 se puede apreciar la curva de carga por fase del tablero TD6.

4.4.2 Comportamiento de la tensión. En la gráfica 26 se puede observar la variación de la tensión del tablero TD6.

Gráfica 25. Curvas de carga por fase en el tablero TD6.



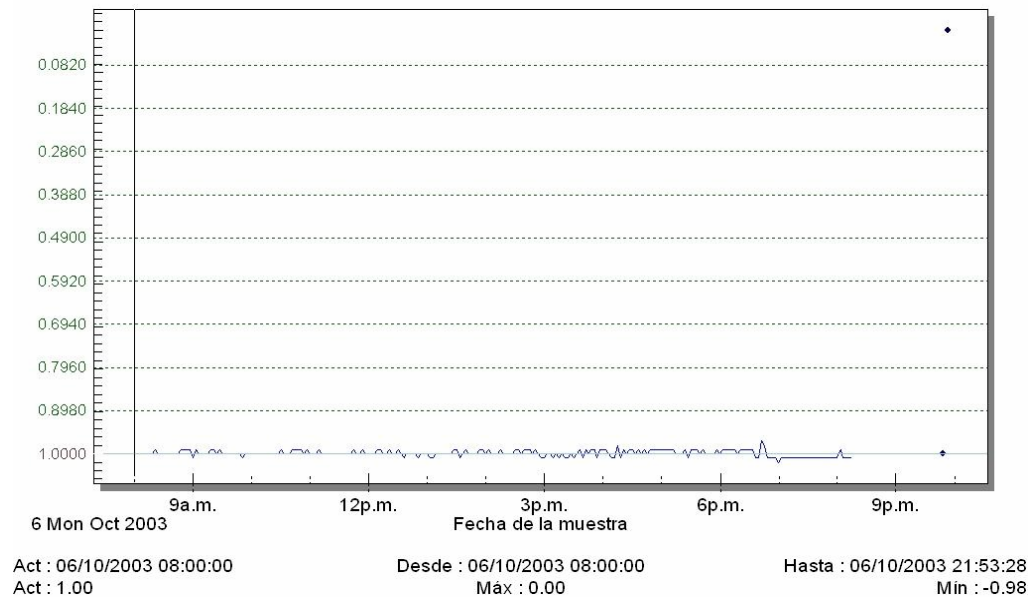
Gráfica 26. Curva de tensión por fase en el tablero TD6.



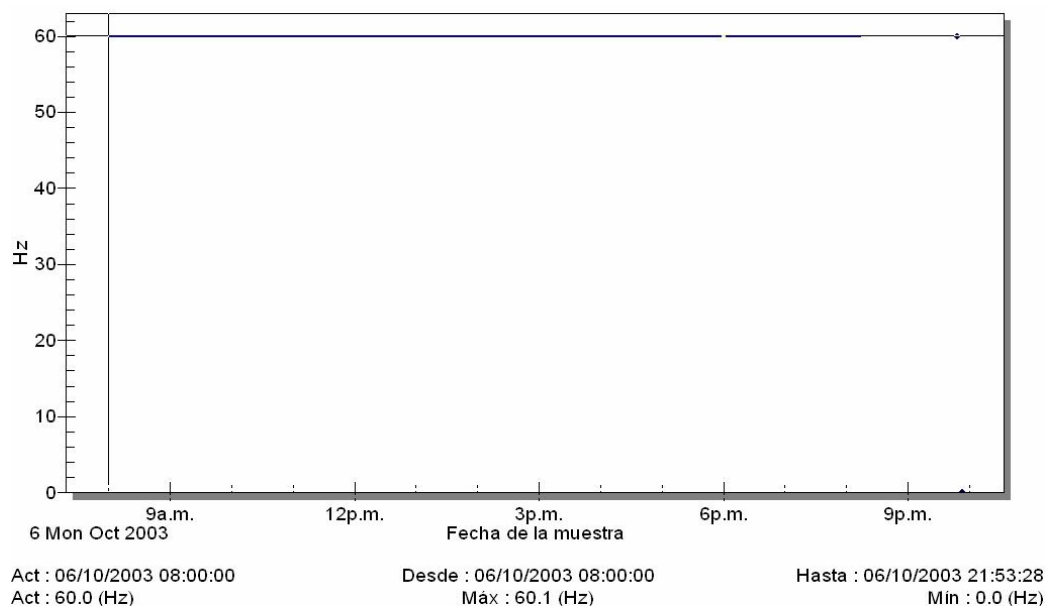
4.4.3 Comportamiento del factor de potencia. En la gráfica 27 se observa el comportamiento del factor de potencia con respecto al tiempo del tablero TD6, esta gráfica muestra que el factor de potencia varía cerca de la unidad cumpliendo con la norma de estar por encima de 0.90.

4.4.4 Comportamiento de la frecuencia. En la gráfica 28 se observa la frecuencia con respecto al tiempo del tablero TD6. En ella se puede ver que permanece constante a 60 Hz.

Gráfica 27. Curva del factor de potencia en el tablero TD6.

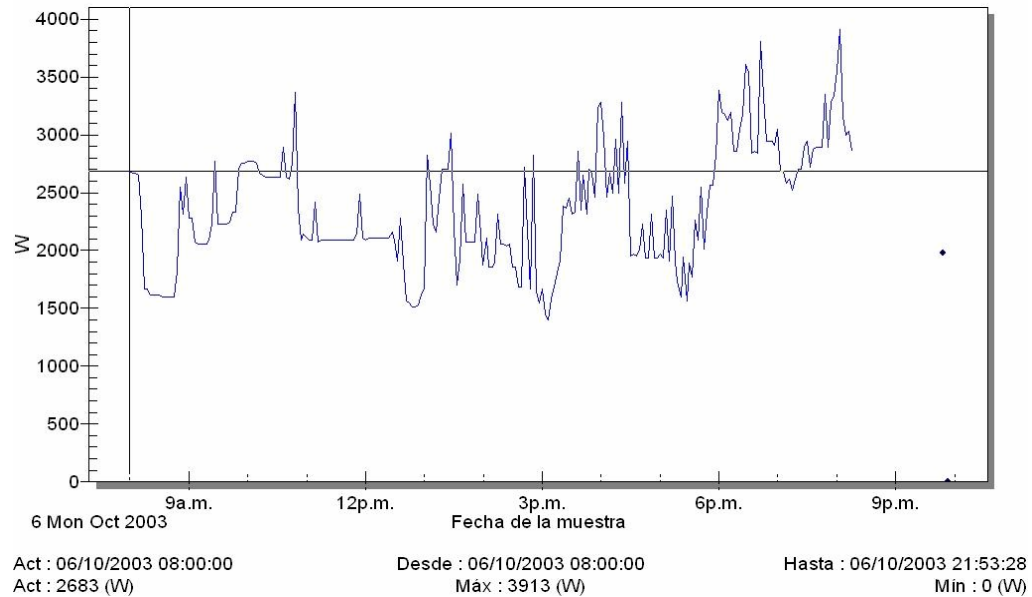


Gráfica 28. Curva de la frecuencia en el tablero TD6.



4.4.5 Comportamiento de la potencia activa. En la gráfica 29 se puede observar la variación de la potencia activa del tablero TD6 con respecto al tiempo.

Gráfica 29. Curva de la potencia activa en el tablero TD6.



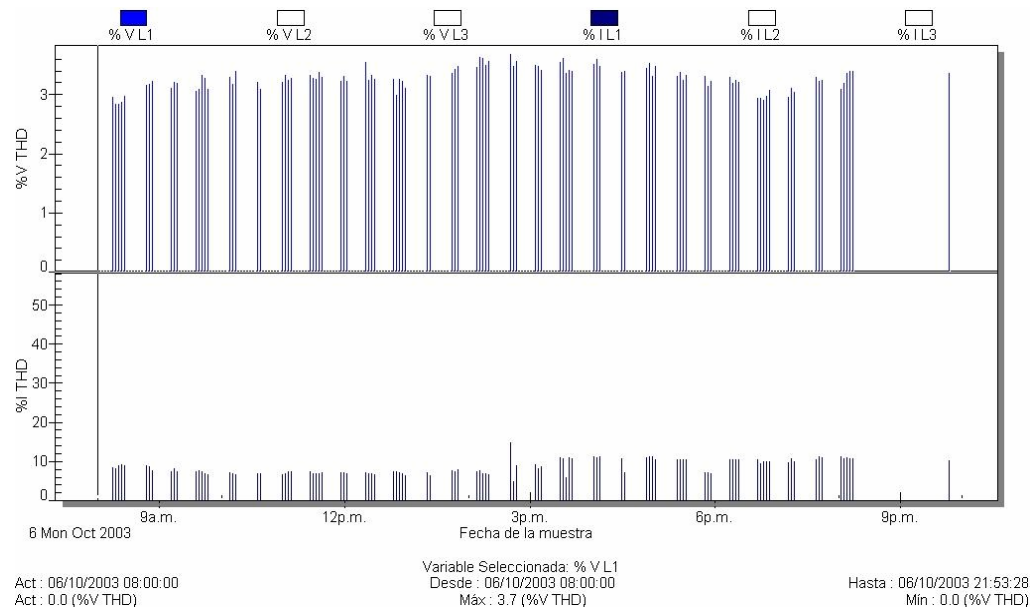
4.4.6 Gráficas de distorsión armónica total. En las tres siguientes gráficas se podrá observar el comportamiento de los THD's de corriente y de tensión para el tablero TD6.

4.4.7 Caracterización del contenido armónico individual. En las siguientes tablas se presenta el análisis individual y total del contenido armónico del tablero TD6.

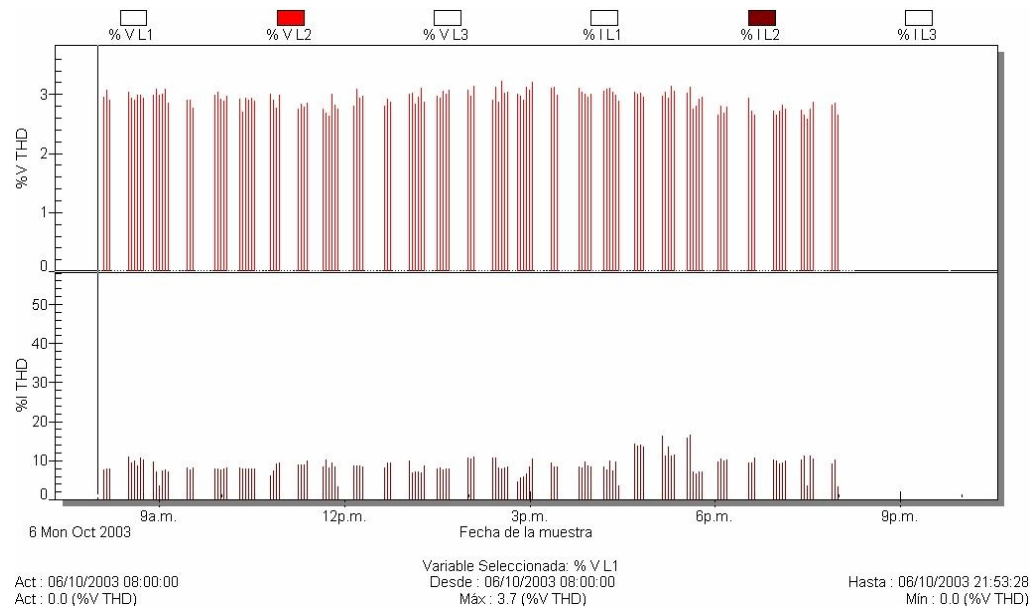
Tabla 23. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero TD6.

TENSION	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	2,8	2,5	2,5
Promedio	3,2854	2,9203	2,9098
Máximo	3,7	3,3	3,2
Desv.Estand	0,1861	0,15251	0,1503

Gráfica 30. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero TD6.



Gráfica 31. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero TD6.



Gráfica 32. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en el tablero TD6.

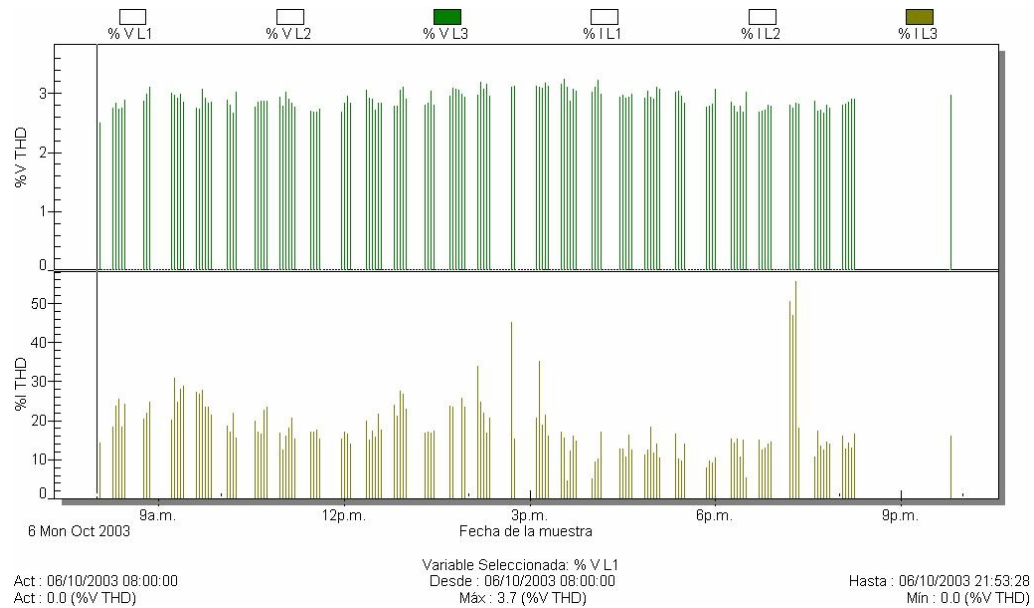


Tabla 24. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero TD6.

CORRIENTE	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	2,8	3,2	0
Promedio	8,6215	9,0407	18,8699
Máximo	14,9	19	55,5
Desv.Estand	2,0195	2,2547	8,5783

Tabla 25. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero TD6.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,027	0,304	1,079	0,168	2	0	57,31	42,69
3	1,448	5,539	13,193	2,763	30	0	79,67	20,33
5	1,645	5,130	6,887	0,881	10	0	54,87	45,13
7	0,424	2,700	6,897	1,244	7	0	0,00	100,00
9	0,336	1,489	2,381	0,305	5	0	4,06	95,94
11	0,008	0,577	1,236	0,267	3	0	92,68	7,32

Tabla 26. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero TD6.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,026	0,895	4,929	0,920	2	24	50,40	49,60
3	0,799	5,944	12,664	2,015	30	0	62,60	37,40
5	1,921	5,065	8,566	1,129	10	0	0,00	100,00
7	0,230	1,787	6,735	0,865	7	0	1,21	98,79
9	0,075	1,194	3,790	0,610	5	0	11,78	88,22
11	0,069	0,740	3,307	0,562	3	1	49,18	50,82

Tabla 27. Análisis individual de corriente para la fase 3 en el tablero TD6.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,000	3,201	10,733	1,986	2	167	46,34	53,66
3	0,000	7,774	53,923	7,740	30	8	40,24	59,76
5	0,000	5,922	29,820	4,503	10	19	84,55	15,45
7	0,000	3,797	22,621	3,555	7	23	69,10	30,90
9	0,000	2,892	15,467	2,558	5	36	36,58	63,42
11	0,000	2,752	17,271	2,349	3	73	46,74	53,26

4.5 TABLERO TF4

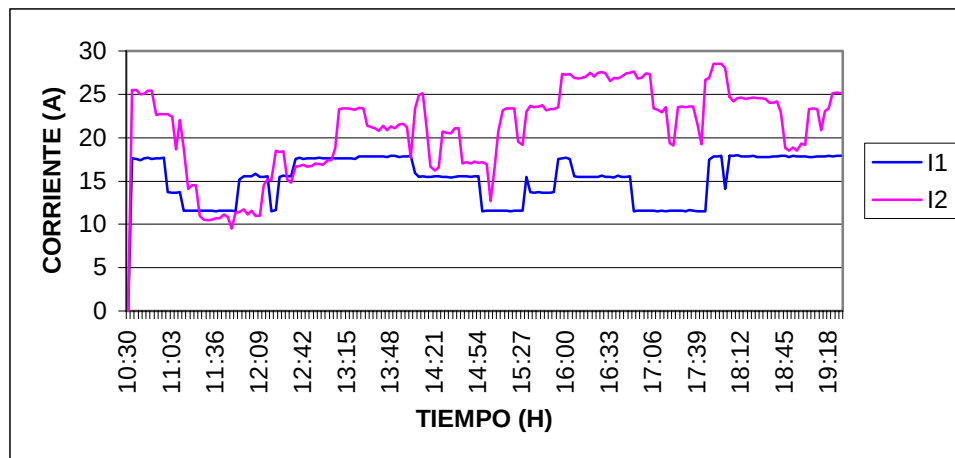
El tablero TF4 está ubicado en el cuarto piso del bloque F donde también está la biblioteca y las salas de lectura individual. Este tablero es el encargado de alimentar la iluminación de los salones del cuarto piso del bloque C, las salas de lectura, el corredor y parte de la iluminación de la biblioteca. En el inventario que se hizo se contaron 94 bombillas fluorescentes, 55 de 2 por 32 W, 10 de 2 por 17 W y las demás son bombillas fluorescentes con balasto electromagnético de 2 por 40W, luego se puede decir que el tablero tiene balastos mezclados.

4.5.1 Comportamiento de la corriente. En la gráfica 33 se puede apreciar la curva de carga por fase del tablero TF4.

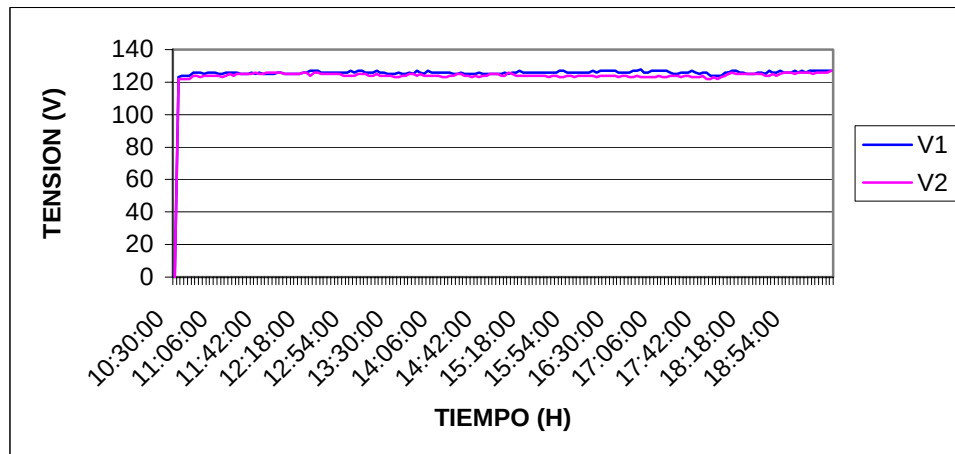
4.5.2 Comportamiento de la tensión. En la gráfica 34 se puede observar la variación de la tensión del tablero TF4.

4.5.3 Comportamiento del factor de potencia. En la gráfica 35 se observa el comportamiento del factor de potencia con respecto al tiempo del tablero TF4, esta gráfica muestra por primera vez que el factor de potencia está en atraso la mayor parte del tiempo.

Gráfica 33. Curvas de carga por fase en el tablero TF4.



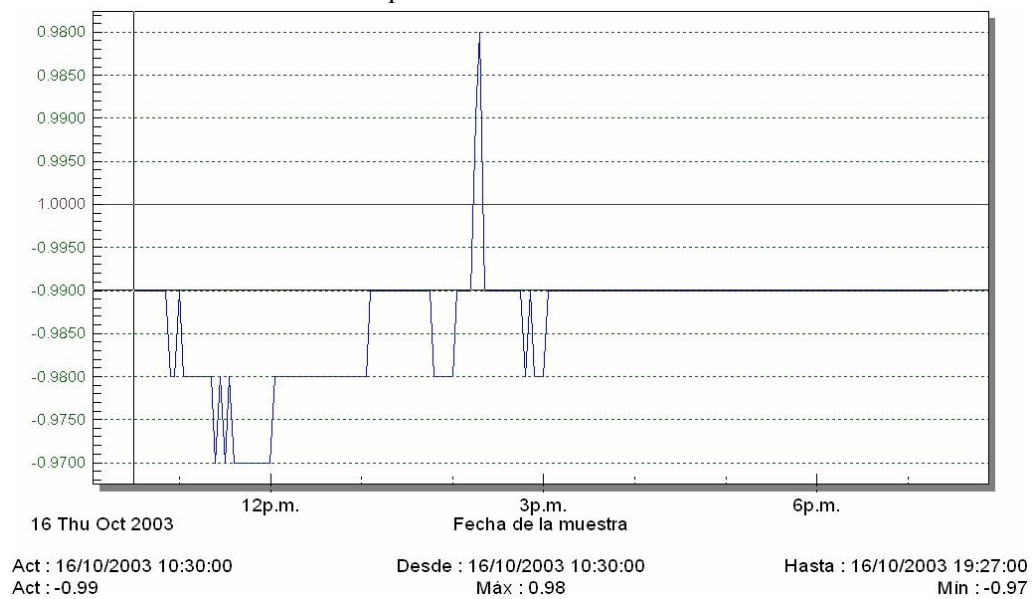
Gráfica 34. Curva de tensión por fase en el tablero TF4.



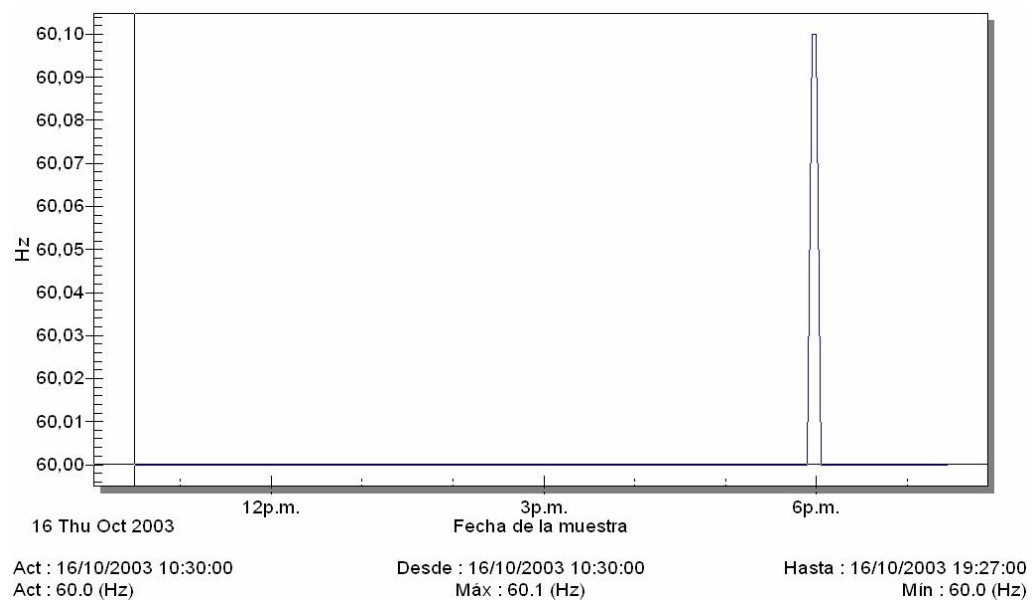
4.5.4 Comportamiento de la frecuencia. En la gráfica 36 se observa la frecuencia con respecto al tiempo del tablero TF4. En ella se puede ver que permanece constante en 60 Hz.

4.5.5 Comportamiento de la potencia activa. En la gráfica 37 se puede observar la variación de la potencia activa del tablero TF4 con respecto al tiempo.

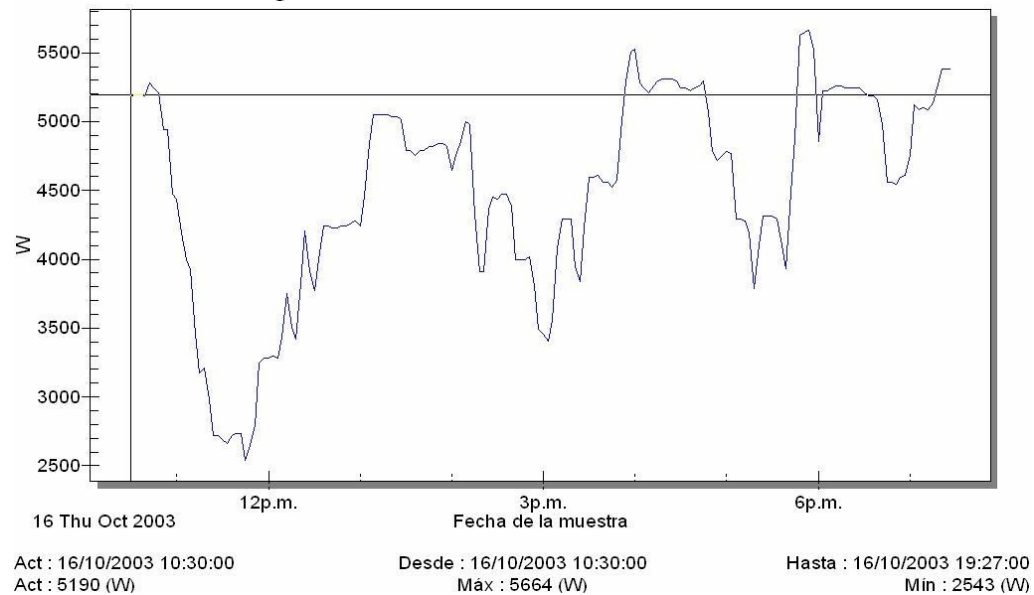
Gráfica 35. Curva del factor de potencia en el tablero TF4.



Gráfica 36. Curva de la frecuencia en el tablero TF4.

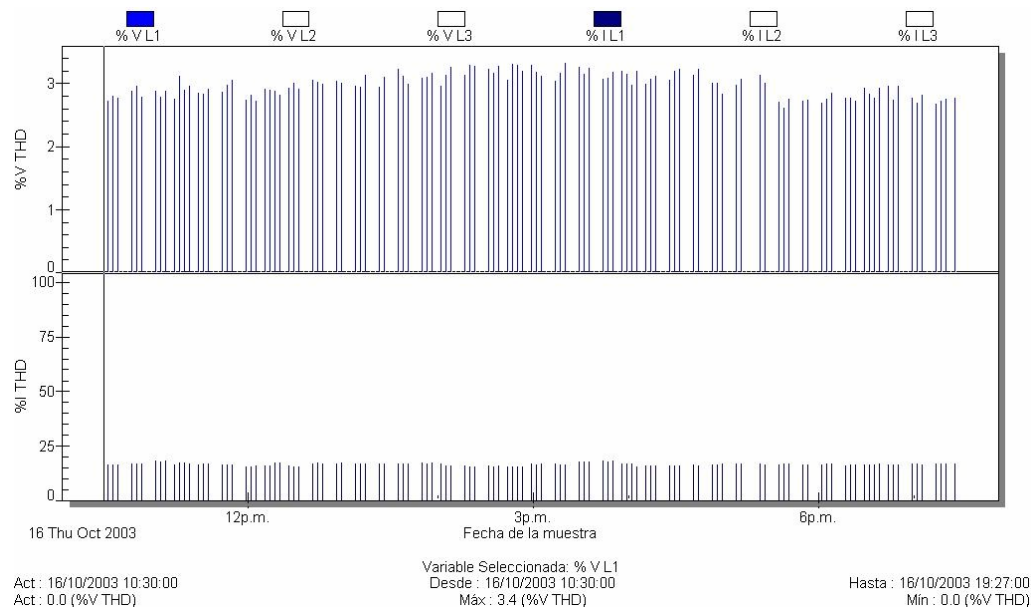


Gráfica 37. Curva de la potencia activa en el tablero TF4.

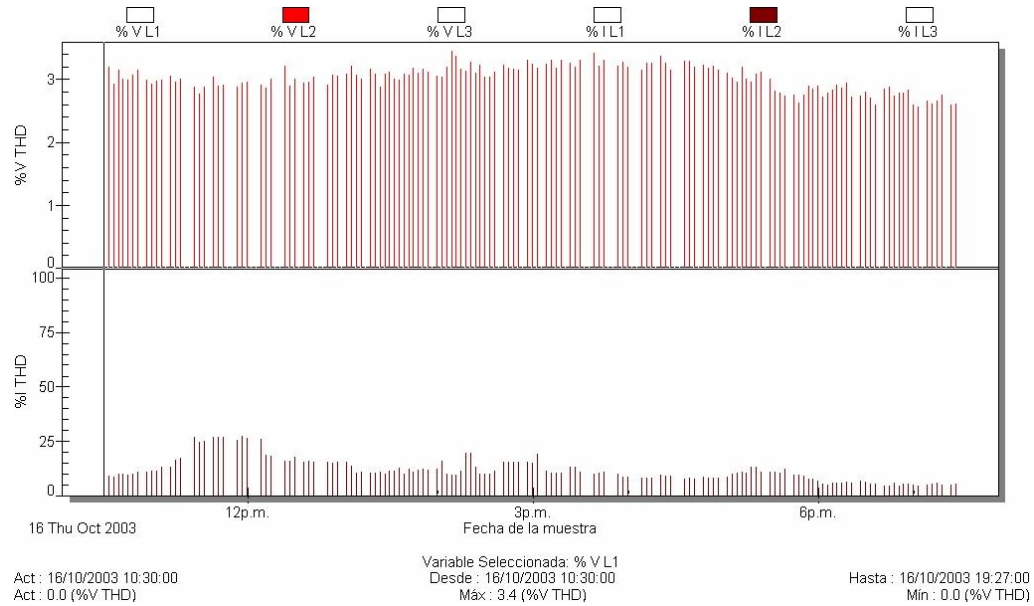


4.5.6 Comportamiento de la distorsión armónica total. En las dos siguientes gráficas se podrá observar el comportamiento de los THD's de corriente y de tensión para el tablero TF4.

Gráfica 38. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en el tablero TF4.



Gráfica 39. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en el tablero TF4.



4.5.7 Caracterización del contenido armónico individual. En las siguientes tablas se presenta el análisis individual y total del contenido armónico del tablero TF4.

Tabla 28. Análisis del THD de tensión por línea en el tablero TF4.

TENSION	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	2,6	2,6	0
Promedio	2,9894	3,0257	0
Máximo	3,4	3,4	0
Desv.Estand	0,1800	0,2053	0

Tabla 29. Análisis del THD de corriente por línea en el tablero TF4.

CORRIENTE	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	15,3	4,3	0
Promedio	16,6581	12,1872	0
Máximo	18,4	33	0
Desv.Estand	0,6274	5,8555	0

Tabla 30. Análisis individual de corriente para la fase 1 en el tablero TF4.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,028	0,234	0,895	0,136	2	0	60,89	39,11
3	14,054	15,458	17,511	0,745	30	0	100,00	0,00
5	5,159	6,118	7,168	0,322	10	0	3,91	96,09
7	1,794	2,182	2,650	0,183	7	0	0,00	100,00
9	0,891	1,300	1,693	0,156	5	0	85,47	14,53
11	0,524	0,908	1,418	0,148	3	0	100,00	0,00

Tabla 31. Análisis individual de corriente para la fase 2 en el tablero TF4.

Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv.Estand.	Límites.IEC	# Dat.Fuera	Ang I. y IV,%	Ang. II y III,%
2	0,015	0,469	9,758	1,333	2	6	59,77	40,23
3	1,036	7,097	27,764	5,309	30	0	5,58	94,42
5	2,732	8,256	18,858	3,313	10	37	100,00	0,00
7	1,630	4,355	8,849	1,467	7	13	0,00	100,00
9	0,439	1,243	2,070	0,253	5	0	0,00	100,00
11	0,362	2,032	4,152	0,665	3	17	100,00	0,00

En el Anexo E se puede apreciar el resumen por tablero de los datos obtenidos en las mediciones.

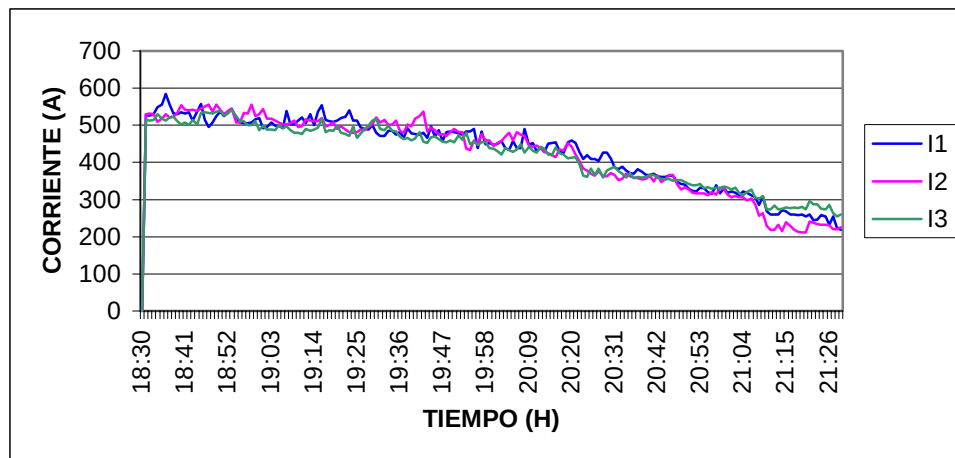
4.6 ACOMETIDA PRINCIPAL

La última medición se realizó en la acometida principal de la Universidad. Lo anterior con el fin de medir el consumo general de la iluminación fluorescente en la Universidad debido a en este periodo de tiempo se presenta el mayor consumo de la misma, pues la mayoría de las bombillas están encendidas y las cargas de computadores no se presentan ya que las oficinas están cerradas y los otros tipos de iluminación como los reflectores de los parqueaderos son muy contados en comparación con la iluminación fluorescente. La medición se efectuó de 6:30 PM a 9:30 PM.

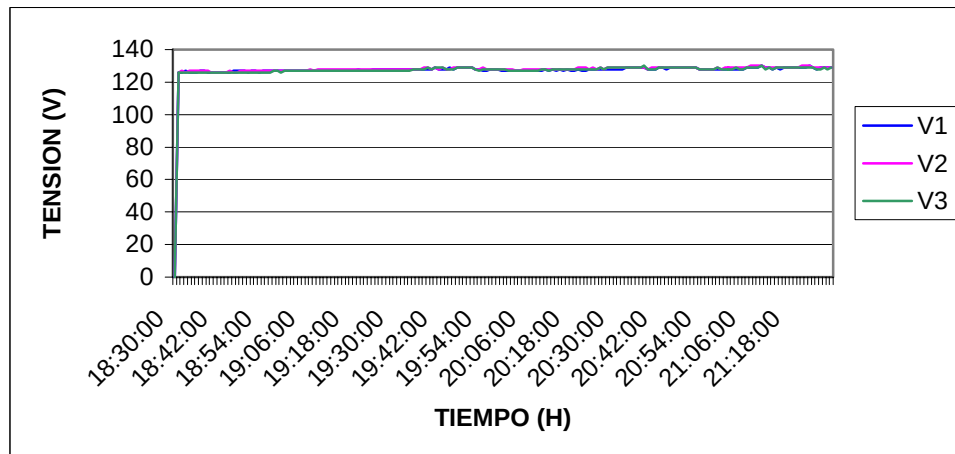
4.6.1 Comportamiento de la corriente. En la gráfica 40 se puede apreciar la curva de carga por fase de la acometida principal de la Universidad.

4.6.2 Comportamiento de la tensión. En la gráfica 41 se puede observar la variación de la tensión de la acometida principal de la Universidad.

Gráfica 40. Curvas de carga por fase en la acometida principal.



Gráfica 41. Curvas de tensión por fase en la acometida principal.

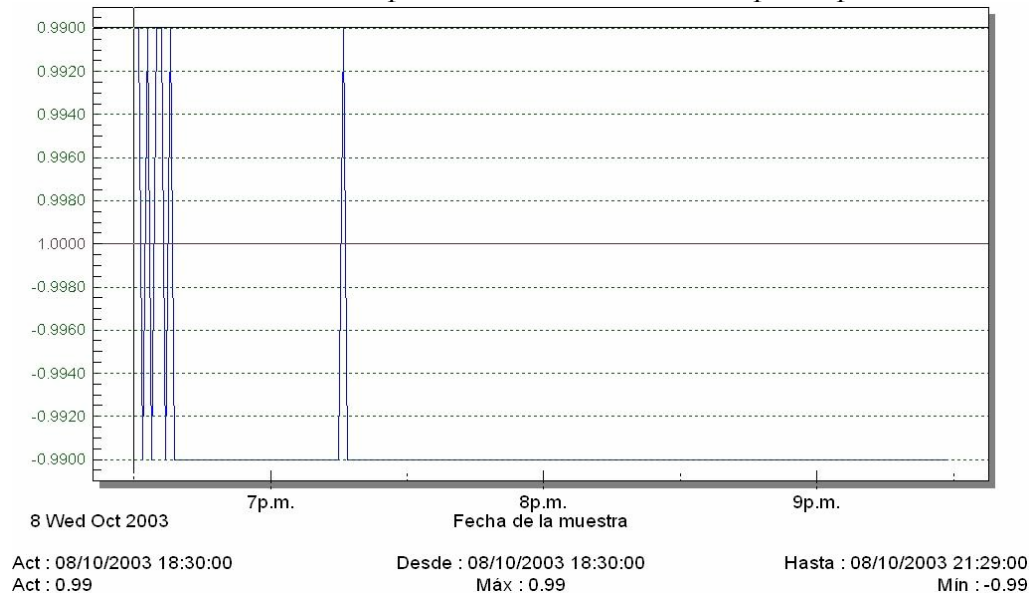


4.6.3 Comportamiento del factor de potencia. En la gráfica 42 se observa el comportamiento del factor de potencia con respecto al tiempo de la acometida principal de la Universidad. Esta gráfica muestra una variación entre 0.9900 y -0.9900 la primera media hora luego se estabiliza en -0.9900 teniendo un pico de 0.9900 a las 7:30 PM y volviendo a su principal valor.

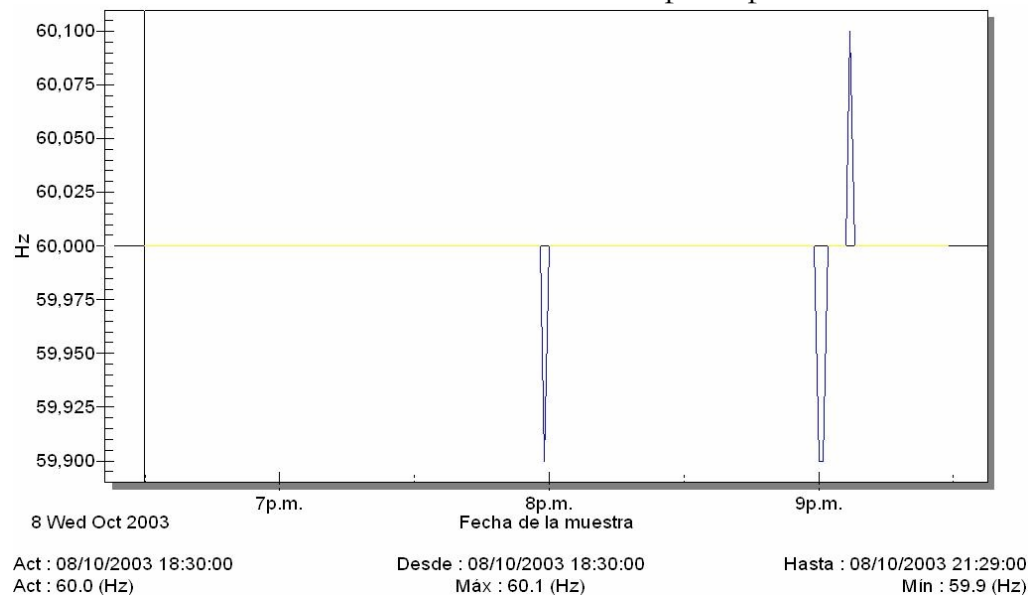
4.6.4 Comportamiento de la frecuencia. En la gráfica 43 se observa el comportamiento de la frecuencia con respecto al tiempo de la acometida

principal de la Universidad. En ella se puede ver que permanece constante en 60 Hz, teniendo unos pocos picos después de las 8 PM.

Gráfica 42. Curva del factor de potencia en la acometida principal.

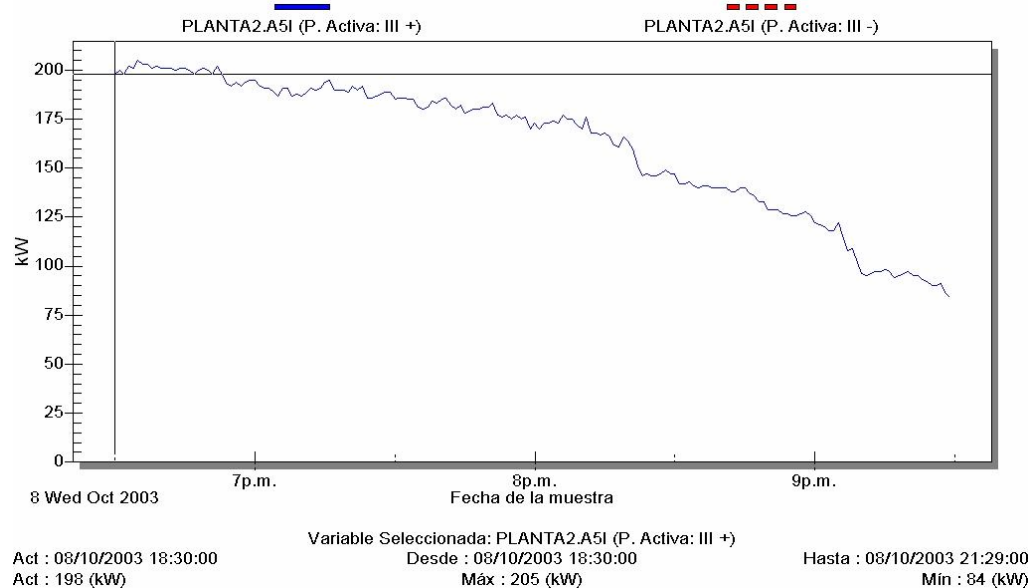


Gráfica 43. Curva de la frecuencia en la acometida principal.



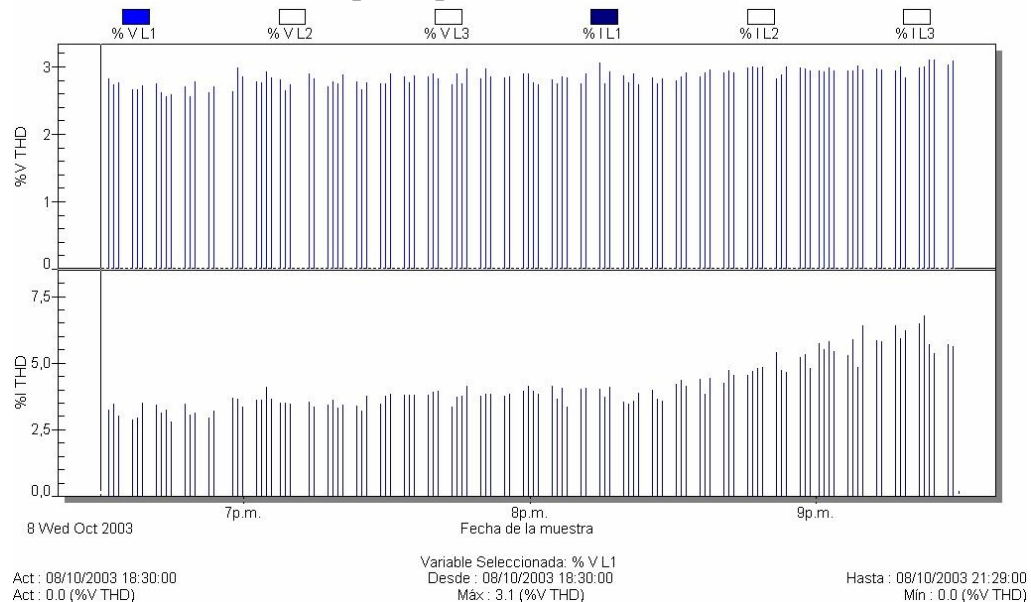
4.6.5 Comportamiento de la potencia activa. En la gráfica 44 se puede observar la variación de la potencia activa de la acometida principal de la Universidad con respecto al tiempo.

Gráfica 44. Curva de la potencia activa en la acometida principal.

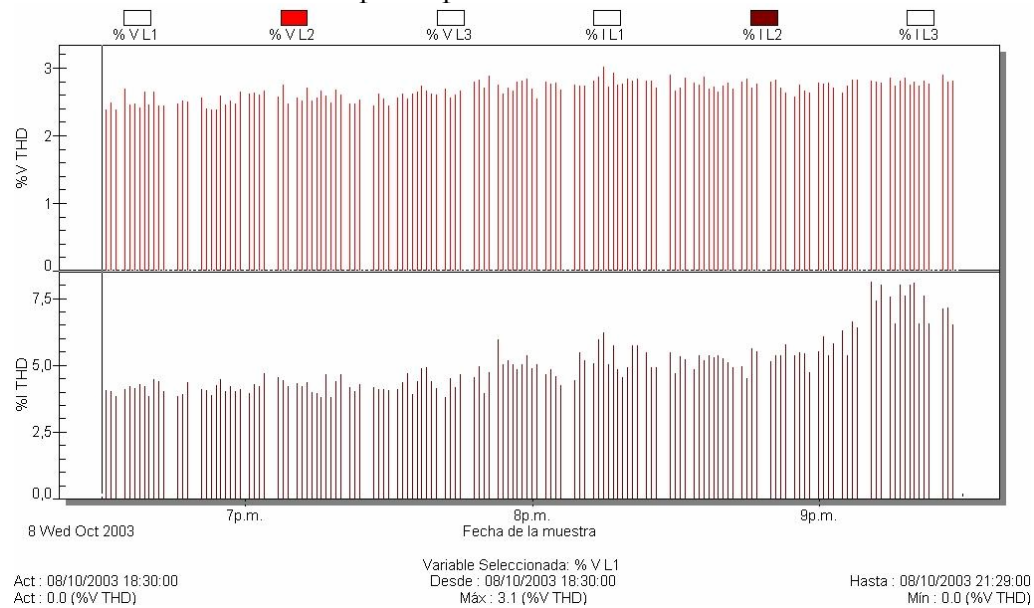


4.6.6 Comportamiento de la distorsión armónica total. En las tres siguientes gráficas se podrá observar el comportamiento de los THD's de corriente y de tensión para la acometida principal de la Universidad.

Gráfica 45. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la primera fase en la acometida principal.



Gráfica 46. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la segunda fase en la acometida principal.



Gráfica 47. Porcentaje de distorsión armónica total de corriente y tensión de la tercera fase en la acometida principal.

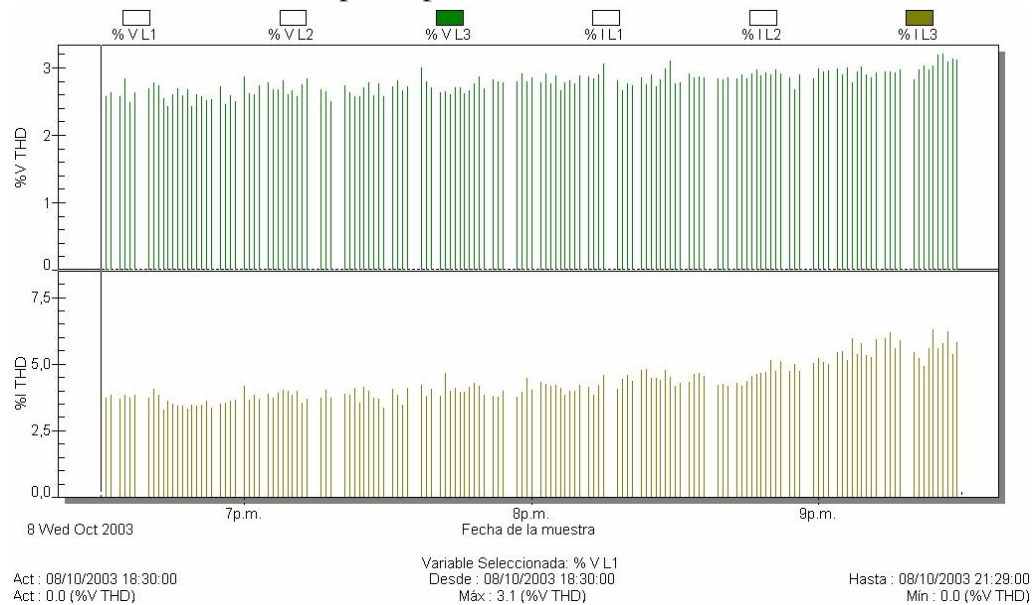


Tabla 32. Análisis del THD de tensión por línea en la acometida principal.

TENSION	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	2,6	2,4	2,4
Promedio	2,8458	2,6782	2,7804
Máximo	3,1	3	3,2
Desv.Estand	0,12417	0,13912	0,15689

Tabla 33. Análisis del THD de corriente por línea en la acometida principal.

CORRIENTE	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	2,6	3,6	3,3
Promedio	4,1358	5,0391	4,3006
Máximo	7	8,1	6,3
Desv.Estand	0,9236	1,0459	0,7022

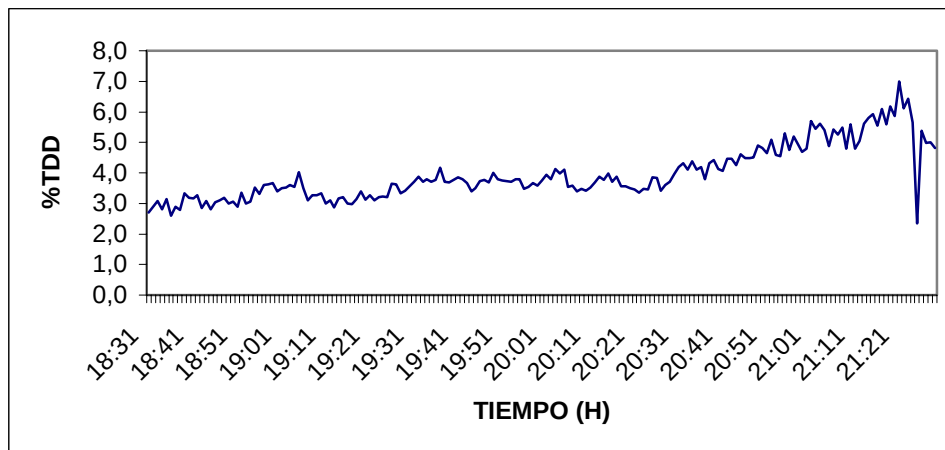
Debido a que la concentración de carga en los tableros era mucho más pequeña comparada con la que se tiene en la acometida principal de la Universidad, aquí se utiliza la norma **IEEE - 519** vista en el primer capítulo en la tabla 2, en esta tabla se puede apreciar que para poder comparar las mediciones obtenidas con ella es necesario conocer la relación I_{CC}/I_C . La corriente de corto circuito se obtuvo de los datos de placa del transformador de la Universidad y tiene un valor de 26,71 kA, con este dato y la máxima corriente de carga que es 585 A se obtiene el valor de la relación la cual da 45,65 para luego referirnos a la tabla 2 del primer capítulo y encontrar los límites de distorsión armónica.

Es importante mencionar que para los análisis anteriormente hechos no se tiene en cuenta el THD que mide el analizador sino que se calcula el TDD visto en el primer capítulo. Las tres gráficas siguientes muestran los valores obtenidos del TDD y la tabla 34 muestra el análisis estadístico.

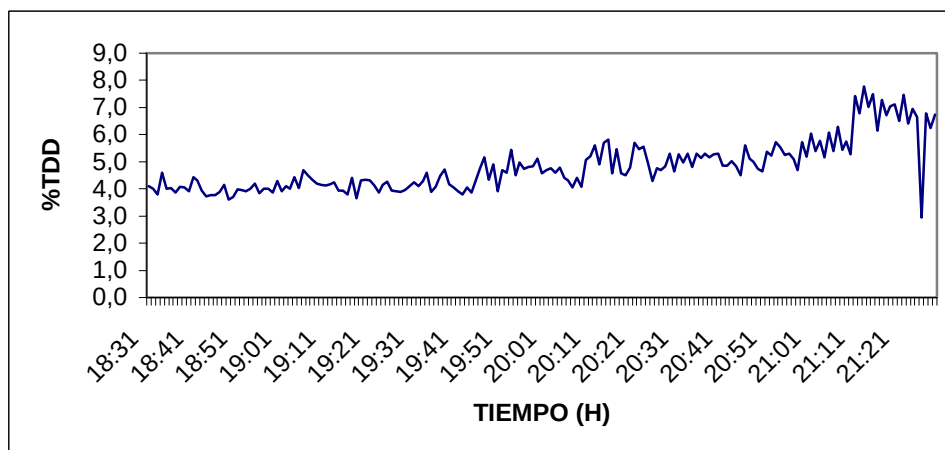
Tabla 34. Análisis del TDD de corriente por línea en la acometida principal.

CORRIENTE	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	2,6	3,6	3,1766
Promedio	3,9730	4,8380	4,1569
Máximo	7	7,7657	6,0690
Desv.Estand	0,8803	0,9391	0,6490

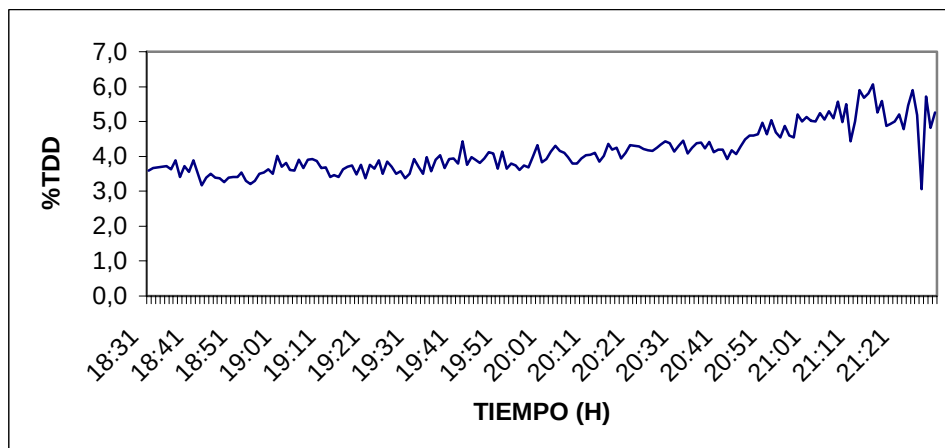
Gráfica 48. Comportamiento del TDD para la fase 1 en la acometida principal.



Gráfica 49. Comportamiento del TDD para la fase 2 en la acometida principal.



Gráfica 50. Comportamiento del TDD para la fase 3 en la acometida principal.



De los valores obtenidos por los anteriores cálculos se observa que la instalación eléctrica de la Universidad cumple con la norma ya que para la tabla 2 el máximo valor del TDD para la relación obtenida es de 8%.

4.6.7 Caracterización del contenido armónico individual. Los límites mostrados en la tabla 2, están dados para los armónicos impares y para los pares es el 25% del valor mostrado. En la tabla 35 se observan los valores máximos del orden de cada armónico por fase y se resaltan los valores que no cumplen con los límites de la tabla 2.

Tabla 35. Caracterización armónica individual por fase.

Orden	FASE 1	FASE 2	FASE 3	LIMITES
2	1,556	2,41	0,889	1,75
3	4,329	5,201	3,386	7
4	0,499	0,769	0,351	1,75
5	3,224	3,398	3,14	7
6	0,333	0,731	0,26	1,75
7	5,033	4,963	4,738	7
8	0,43	0,412	0,258	1,75
9	1,235	2,984	1,701	7
10	0,305	0,675	0,303	1,75
11	1,54	2,95	2,649	3,5
12	0,293	0,354	0,25	0,875
13	0,944	1,655	1,241	3,5
14	0,642	0,625	0,598	0,875
15	0,658	0,755	0,563	3,5
16	0,684	0,411	0,432	0,875
17	0,667	0,449	0,673	2,5
18	0,366	0,294	0,405	0,625
19	0,489	0,711	0,45	2,5
20	0,401	0,291	0,351	0,625
21	0,396	0,414	0,559	2,5
22	0,356	0,377	0,322	0,625
23	0,441	0,392	0,369	1
24	0,36	0,336	0,293	0,25
25	0,462	0,467	0,309	1
26	0,341	0,303	0,306	0,25
27	0,447	0,48	0,34	1
28	0,485	0,457	0,394	0,25
29	0,359	0,452	0,275	1
30	0,3	0,311	0,207	0,25

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES

- En todos los tableros, como se puede apreciar, los porcentajes de distorsión armónicos de tensión cumplen con la norma de la IEEE 519-92 ya que ninguna de las mediciones sobrepasa el 5% especificado por ésta norma.
- El análisis estadístico de la información relacionada con los porcentajes de distorsión de corriente mostró que:
 - En el tablero de la cafetería todos los límites propuestos por la norma IEC no se cumplen ya que en todas las tres fases los valores máximos sobrepasan estos límites así como también algunos promedios de la primera fase y la mayoría de la segunda y tercera fase, esto debido a la mezcla de balastos en los circuitos y al desbalance presentado en las fases.
 - En el tablero de la sala de exposiciones se puede observar que no hay ningún dato fuera los límites y se puede decir que este tablero es el único que cumple con todos los límites, pues este tablero es el único que presenta las mejores condiciones ya que todos sus balastos son electrónicos y además se encuentra bien balanceado.
 - En el tablero TA7 se puede apreciar que varios datos están por fuera de la norma, presentando más en la primera fase para los armónicos 5, 7 y 9, en las demás fases hay algunos pocos datos que no cumplen con los límites, pero como se puede apreciar en el cuadro comparativo del Anexo E el porcentaje de datos por fuera de los límites es muy bajo.
 - En el tablero TD6 se puede apreciar que sólo el armónico 2 de la segunda fase está por fuera de los límites, la primera fase cumple en todos y mientras la tercera presenta ruido ya que se encuentra subutilizada.
 - En el tablero TF4 se puede apreciar que la primera fase cumple con los límites, mientras que en la segunda hay datos que sobrepasan estos límites en los armónicos 2, 5 y 11 debido a que los balastos de esta fase se encuentran mezclados.

- En la acometida principal de la Universidad se calcularon los TDD's para su posterior análisis y como se puede apreciar cumple con los límites establecidos para la norma IEEE 519-92. Pero al hacer el análisis individual se observó que en los armónicos 2, 24, 26, 28 y 30 hay un valor máximo que los sobrepasa.
- Como se puede ver solamente uno de los cinco tableros cumplió a cabalidad con la norma, los cuatro restantes presentaron niveles que sobrepasan los algunos límites.
- Una comparación entre el tablero de la cafetería y el TF4 muestra hay mayor contaminación por parte del tablero de la cafetería, el cual tiene conectados el 34% de balastos electromagnéticos frente al 12 % del tablero TF4, por lo que se puede concluir que a mayor número de balastos electromagnéticos mayor es la contaminación presentada.
- Se puede concluir que la combinación de balastos electrónicos con los electromagnéticos aumentan los niveles de los armónicos y que tableros con solo balastos electrónicos como el de la sala de exposición y el TD6 cumplen satisfactoriamente con la norma.
- Al observar el Anexo B de las visitas a tableros se puede apreciar que la gran mayoría de tableros tienen iluminación fluorescente con balastos mezclados y cargas de computadores con UPS's lo cual es malo para la calidad de potencia como se puede apreciar en el tablero de la cafetería.
- Un vistazo al cuadro de resumen comparativo del Anexo E muestra lo siguiente:
 - El tablero de la cafetería y el TA7 violan todos los límites propuestos por la norma IEC en los armónicos 2, 3, 5, 7, 9 y 11 para todas las tres fases.
 - El único tablero que cumple con la norma IEC en todas sus tres fases es el de la sala de exposición, así como las primeras fases de los tableros TD6 y TF4.
 - Los armónicos que más contaminación aportan saliendo hacia a la red son: el armónico 7 en la primera fase de los tableros de la sala de exposición, TA7, TD6 y TF4. Para la segunda fase predominan los armónicos 5 y 7 que salen hacia la red en cuatro de los cinco

tableros y para la tercera fase el armónico que más predomina es el 2.

- En el tablero de la cafetería se observa que el 5 armónico contribuye con el 84.55% de 145 datos fuera del límite que sale hacia la red para la primera fase, mientras que para la segunda, el mismo armónico contribuye con el 81.36% de 184 datos fuera de los límites que igualmente sale hacia la red.

- Como se puede observar en las mediciones hechas en todos los tableros, la variación de la tensión cumple con las normas establecidas de regulación del 10 % (mencionada en el artículo 12 la bibliografía de este proyecto) manteniéndose dentro de este rango.
- Como se puede observar en las curvas de carga, varios tableros se encuentran desbalanceados pues algunas fases se encuentran subutilizadas como la tercera fase del tablero de la cafetería. En el tablero TA7 la mayoría de la carga se encuentra soportada por la segunda fase, en el tablero TD6 la tercera fase no se utiliza y en el tablero TF4 no hay tercera fase.
- Las gráficas del factor de potencia y de la frecuencia muestran un comportamiento normal ya que en la mayoría de los casos cumplen con la norma (CREG 070/98 factor de potencia de 0.9 y de 60 ± 0.2 Hz). El tablero de la cafetería presenta el más bajo factor de potencia llegando a un valor de 0.81.
- Las gráficas de la potencia activa en cada tablero muestran su consumo y como se puede apreciar es muy variable debido a que no en todos los salones hay siempre clases, el único tablero que presenta una curva constante de potencia es el de sala de exposición ya que las bombillas estuvieron encendidas todo el día.
- En general la problemática ocasionada en las instalaciones de la Universidad por la iluminación con bombillas fluorescentes no es crítica ya que no se encuentran problemas severos que afecten a los demás equipos y la mayor parte de las veces se encontró que se cumple con las normas mencionadas.

5.2 RECOMENDACIONES.

- Se recomienda acelerar el cambio de las bombillas y los balastos que iluminan la cafetería ya que es el tablero que mayor contaminación presenta para la instalación.
- Para todos los tableros menos para el de la sala de exposición se recomienda hacer un balance de carga ya que en el tablero de la cafetería la fase tres se encuentra subutilizada, en el tablero TA7 la mayoría de la carga está soportada en la segunda fase, y en el tablero TD6 al igual que el tablero de la cafetería la tercera fase no se utiliza.
- Para el tablero TF4 se recomienda hacerle un cambio total ya que es demasiado viejo y sus conductores tienen el aislamiento en nylon y ya se están deshilachando, lo cual podría ocasionar un corto o un incendio. También las protecciones son muy obsoletas y podrían en un determinado momento no operar.
- Se recomienda hacer un nuevo levantamiento de planos para la Universidad ya que muy pocos circuitos corresponden a los que están plasmados en los planos debido a los continuos cambios que ha sufrido la Universidad a través del tiempo.
- Es recomendable hacer un seguimiento al comportamiento de las bombillas fluorescentes con balastos electrónicos ya que es importante observar los efectos que presentan pues la carga conectada en la Universidad es considerable.
- Sería importante seguir con la política de cambiar las bombillas fluorescentes con balasto electromagnético a electrónico pero de manera ordenada por circuitos y no cambiando la bombilla que se encuentra dañada ya que éstas bombillas presentan grandes beneficios como el ahorro de energía, vida útil más larga, excelente reproducción cromática y menor daño al medio ambiente.
- Es recomendable realizar este tipo de estudio en los sectores comercial e industrial para determinar el nivel de distorsión armónica en el sistema eléctrico al implementar el uso de este tipo de iluminación, ya que en estos sectores se presentan otros tipos de cargas no lineales.

BIBLIOGRAFIA

FINK/BEATY. MANUAL DE INGENIERIA ELECTRICA. Mc Graw Hill, 1995, p. 23-10.

FINK/BEATY. MANUAL DE INGENIERIA ELECTRICA. Mc Graw Hill, 1995, p. 23.5.

MCCLUSKEY R., DWYER R., "Evaluation of Harmonic Impact from Compact Fluorescent Light on Distribution Systems" IEEE Transaction on Power System. 1995.

DAVID KREISS. "Harmonic Analyser helps solve power problems". E.C. Magazine. March 1989, p. 73-76.

MITCHELL JOHN E. "Distortion Factor: The new problem of Power Factor. IEEE Transaction on Power System. 1992.

BEMIS J., "Compact Fluorescent Lamp Test". IEEE 1992

ADVANCE AND TRANSFORME CO. "The ABC's of Electronic Ballasts". 1989.

PHILIPS. "Catálogo Bombillas Ahorradoras de Energía".

VERDERBER RUDOLPH., "Performance of electronic ballasts and controls with fluorescents lamps". IEEE 1989.

MELHORN C, J. "Effect of high efficiency lighting on power quality in public buildings". 1995 IEEE.

FORMATO DE VISITAS A TABLEROS DE LA UNIVERSIDAD DE LA SALLE SEDE CENTRO

TABLERO	UBICACIÓN	# DE CIRCUITOS	# CTOS. DE ILUMINACION	# DE LUMINARIAS	BALASTO	POTENCIA	OBSERVACIONES
TG 4-1							
							MUSEO
TG 3-1							
							MUSEO
TG 2-1							
							MUSEO
CFC							
							ESCUEL-IGLESIA
CFB							
							ESCUEL-IGLESIA
TES 2-1							
							ESCUEL-IGLESIA
TES 1-1							
							ESCUEL-IGLESIA
TB 3	PISO 3 BL B	4	1	6	ELECTR ONICO	6/2x17	
TC 3-2	PISO 3 BL C	18	12	68	MEZCLA DO	5/2x59	CAFETERIA
						25/2x32	7/2x75;2/2x40
						15/2x17	16/2x20
TC 4-1	PISO 4 BL C						
							FOTOCOPIADORA

[illegible]

ANEXO E

CUADRO DE RESUMEN COMPARATIVO

TABLERO	BALASTO	Máximos valores de THD para tensión			Máximos valores de THD para corriente			Armónicos que sobrepasan los límites IEC			% de Armónicos que salen hacia la red			% de Datos Fuera de los Límites		
		FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 1	FASE 2	FASE 3
CAFETERIA	MEZCLADO	3,6	3	3,4	38,4	59	71,4	2, 3, 5, 7, 9 y 11	2, 3, 5, 7, 9 y 11	2, 3, 5, 7, 9 y 11	2, 54%; 5, 85%; 9, 53%; 11, 51%	5, 81% y 11, 58%	2, 52%; 3, 73%; 9, 72%	2, 0,9%; 3, 8%; 5, 66%; 7, 38%; 9, 25%; 11, 50%	2, 5%; 3, 56%; 5, 84%; 7, 81%; 9, 75%; 11, 80%	2, 30%; 3, 77%; 5, 96%; 7, 89%; 9, 79%; 11, 85%
SALA DE EXPOSICION	ELECTRONICO	2,6	3,4	3,1	4,9	7,7	14,6	NINGUNO	NINGUNO	NINGUNO	2, 57%; 7, 92%; 9, 53%	2, 54%; 3, 92%; 7, 93%	2, 54%; 3, 64%; 7, 69%	NINGUNO	NINGUNO	NINGUNO
TABLERO TA7	ELECTRONICO	3,1	3,8	4,9	74,3	71,7	43,1	2, 3, 5, 7, 9 y 11	2, 3, 5, 7, 9 y 11	2, 3, 5, 7, 9 y 11	3, 100%; 7, 91%; 11, 72%	5, 83%; 7, 99%; 11, 98%	2, 51%; 5, 98%	2, 0,6%; 3, 0,6%; 5, 9%; 7, 9%; 9, 9%; 11, 1%	2, 2%; 3, 1%; 5, 1%; 7, 1%; 9, 1%; 11, 1%	2, 0,6%; 3, 0,6%; 5, 0,6%; 7, 0,6%; 9, 0,6%; 11, 0,6%
TABLERO TD6	ELECTRONICO	3,7	3,3	3,2	14,9	19	55,5	NINGUNO	2 y 11	2, 3, 5, 7, 9, 11	7, 100%; 9, 96%	5, 100%; 7, 99%; 9, 88%; 11, 51%	2, 54%; 3, 60%; 9, 63%; 11, 53%	NINGUNO	2, 9,8%; 11, 0,4%	2, 69%; 3, 3,3%; 5, 7,8%; 7, 9,4%; 9, 15%; 11, 30%
TABLERO TF4	MEZCLADO	3,4	3,4	0	18,4	33	0	NINGUNO	2, 5, 7 y 11	0	5, 96%; 7, 100%	3, 94%; 7, 100%; 9, 100%	N/A	NINGUNO	2, 3%; 3, 0%; 5, 20%; 7, 7%; 9, 0%; 11, 9%	N/A

*EVALUACIÓN DEL IMPACTO
DE LÁMPARAS
FLUORESCENTES CON
BALASTOS ELECTRÓNICOS
EN LA CALIDAD DE POTENCIA*

PRESENTADO POR:

RODRIGO ESTEBAN PUENTES IREGUI

INTRODUCCION

La luz artificial ha hecho que el hombre aproveche más su tiempo libre, además, ha sido una herramienta fundamental para su progreso y bienestar. Esta ha hecho que todas y cada una de las actividades cotidianas de las personas no se vean interrumpidas al momento de ocultarse el sol, permitiendo realizarlas de una manera más cómoda y segura ya que se puede trabajar, viajar, leer, divertirse y descansar entre otras.

Por más de veinte años los balastos electromagnéticos han sido los únicos elementos disponibles en el mercado que controlan las bombillas fluorescentes. Los últimos adelantos de la tecnología han desarrollado los nuevos balastos electrónicos, los cuales se están empezando a instalar en la industria Colombiana.

EL PROBLEMA

De acuerdo con estudios realizados anteriormente se puede observar que la calidad de la potencia suministrada se está viendo afectada, entre otros, por los componentes electromagnéticos utilizados en la industria colombiana. Estos componentes electromagnéticos ocasionan una baja calidad de potencia representada en la distorsión de las formas de onda de los voltajes y corrientes en una instalación particular. Este problema se incrementa aun más debido a la cantidad y capacidad de dispositivos electrónicos no lineales que se están utilizando. Los componentes anteriormente descritos producen la distorsión de una señal sinusoidal pura y ésta se expresa en términos de componentes armónicos.

Las bombillas fluorescentes brindan un ahorro de energía significativo frente a las incandescentes. Como resultado de esto hacen parte de programas de conservación de energía que se llevan a cabo en aplicaciones tanto en el sector residencial como en el comercial. Por otra parte, las bombillas fluorescentes tienden a incrementar los niveles de distorsión armónica en los sistemas de distribución. Se ha encontrado que este tipo de bombillas presenta un alto nivel de distorsión armónica en la onda de corriente lo que provoca contaminación en el sistema y problemas en la operación de equipos sensibles a este tipo de distorsión armónica. Es probable que al difundir su uso, se verá afectada la calidad de servicio del sistema gracias a sus características y su principio de funcionamiento.

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la influencia que presentan las bombillas fluorescentes con balastos electrónicos en la calidad de potencia de una instalación.
- En el estudio que aspiramos a realizar, proponemos la aplicación de la nuevas tecnologías de medida y monitoreo, que ha adquirido la Universidad, en la sede del centro, para observar y diagnosticar la calidad de la potencia y proponer alternativas de mejoramiento que reduzcan los costos actuales del consumo de energía.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Consultar la información teórica para entender conceptualmente el problema y los daños que se ocasionan.
- Reunir la información mas relevante sobre las instalaciones y equipos y sobre los dispositivos de medición y monitoreo.
- Capturar de manera planificada y organizada, medidas de variables y parámetros eléctricos en sitios previamente determinados.
- Analizar la información para cuantificar la problemática ocasionada por el uso de balastos electrónicos.

GENERALIDADES

La calidad de potencia es un término por medio del cual se entiende el estándar de calidad que debe tener el suministro de la energía en las instalaciones eléctricas, en términos de:

- Tensión o voltaje constante.
- Forma de onda sinusoidal.
- Frecuencia constante.

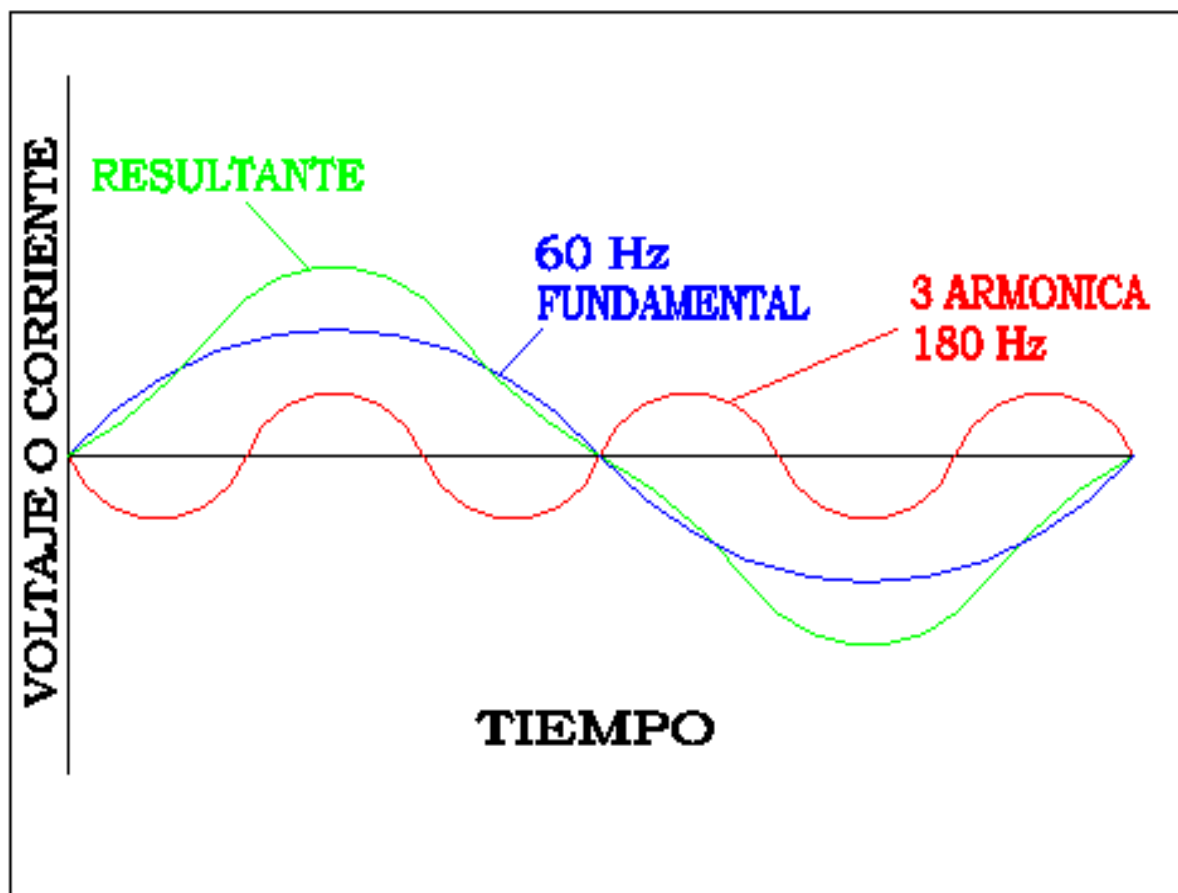
CONCEPTOS FUNDAMENTALES

- Impulsos: Los impulsos son condiciones de sobrevoltaje que duran menos de medio ciclo.
- Spikes: Son los picos de transitorios de tensión muy elevada medidos en kilovoltios que tienen duraciones del orden de micro o nano segundos. Debido a la poca energía que contienen y a su corta duración generalmente traspasan las protecciones.
- Ruido: Número elevado de transitorios presentes en la forma de onda.
- Sags: Son los descensos o caídas de tensión manteniendo la frecuencia industrial.
- Swells: Son incrementos de la tensión, también manteniendo la frecuencia industrial.

Fliker: Es una variación de tensión de entrada con una duración suficiente como para percibir un cambio en la intensidad luminosa o parpadeo en bombillas incandescentes y fluorescentes.

Armónicos: Los armónicos son corrientes o tensiones con frecuencias enteras o múltiplos de números enteros de frecuencias fundamentales. Cuando éstas se combinan con las ondas sinusoidales fundamentales, forman una onda distorsionada, repetitiva, no sinusoidal. Equipos de consumo no lineal como televisores o computadores generan corrientes armónicas que pueden causar problemas de distorsión y esto se refleja en:

- Operación errática del equipo computarizado.
- Sobrecalentamiento de equipo y conductores.
 - Disparo de interruptores.

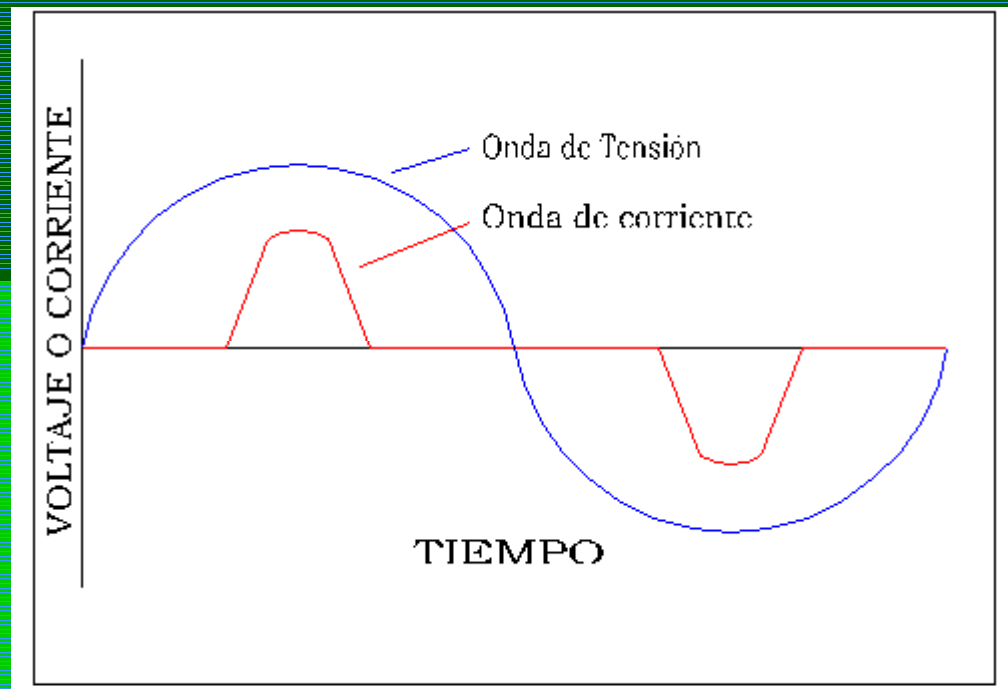


Los sistemas de iluminación fluorescentes son de gran popularidad debido a su gran ventaja dada en lúmenes/vatios frente a la que se obtiene con las bombillas incandescentes tradicionales. Debido a su mayor eficiencia son usadas cada vez más en áreas comerciales y residenciales y por consiguiente consumen una parte considerable de potencia en los sistemas de distribución. Sin embargo, la forma de onda de corriente de estas bombillas es, en su mayoría, no sinusoidal debido a su mecanismo de descarga y a su balasto electrónico.

DISTORSION ARMÓNICA

La distorsión armónica es una forma de ruido eléctrico. Es la superposición de señales con múltiplos de la frecuencia fundamental de la potencia sobre la onda sinusoidal de la misma. Las cargas lineales, las que toman corriente en proporción directa del voltaje aplicado, no generan grandes niveles de armónicos. Las cargas no lineales toman corriente en pulsos. Estas corrientes de pulsos crean caídas de voltaje en todo el sistema como resultado de la interacción de la corriente con la impedancia del sistema. Las distorsiones de corriente creadas por cargas no lineales pueden crear distorsión más allá de las instalaciones internas de los terrenos de la planta, a través del sistema de la compañía de servicio o en las instalaciones de otro vecino.

Debido al sistema de rectificación que estos equipos utilizan, la corriente solo fluye en una parte del ciclo y su forma se parece a un pico. Esta onda puede considerarse como una componente fundamental mas un número de armónicos múltiplos de la frecuencia fundamental. Los armónicos, aunque están presentes en la forma de onda y en la potencia aparente, no hacen contribución a la potencia real.



DISTORSION ARMONICA TOTAL

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \times 100$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \times 100$$

FACTOR DE DISTORSION DE DEMANDA

El factor de distorsión de demanda o TDD es un indicador que tiene en cuenta la evaluación temporal de los porcentajes de los THD's sobre un periodo de tiempo determinado.

$$TDD = THD \times \frac{I_{CARGA}}{I_{CARGA \text{ MAX}}}$$

FUENTES DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE

- U.P.S.
- Rectificadores industriales.
- Variadores de velocidad.
- Computadores.
- Transformadores en saturación.

FUENTES DE ARMÓNICOS DE TENSIÓN

- Hornos de arco.
- Equipos de soldadura.
- Bombillas de descarga.

EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS

Transformadores. La disminución de la potencia aparente efectiva por calentamiento en los bobinados.

Condensadores. El deterioro en los dieléctricos de los condensadores

Conductores. Calentamientos debido al incremento de su resistencia y esto se produce gracias a el efecto **skin** o piel.

Equipos de medida, protección, control y comunicaciones. Errores en las mediciones al variar los valores eficaces de los voltajes y corrientes medidas. Los armónicos pueden llegar a generar picos de corriente que pueden producir disparos erróneos de las protecciones y en los equipos de control y comunicación, los armónicos producen ruido eléctrico, errores en la regulación, falsas salidas e interferencia.

Iluminación. Los efectos de los armónicos en las bombillas producen una vida útil más corta.

LA NORMA IEEE 519-92

Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución generales (<69 kV).

MAXIMA DISTORSION DE CORRIENTE ARMONICA EN PORCENTAJE DE LA CORRIENTE DE CARGA

ARMONICAS DE CORRIENTE INDIVIDUAL (IMPARES)

I_{cc} / I_L	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<h	TDD I (%)
<20	4.00	2.00	1.50	0.60	0.30	5
20<50	7.00	3.50	2.50	1.00	0.50	8
50<100	10.00	4.50	4.00	1.50	0.70	12
100<1000	12.00	5.50	5.00	2.00	1.00	15
>1000	15.00	7.00	6.00	2.50	1.40	20

LIMITES DE DISTORSIÓN DE TENSIÓN

VOLTAJE DEL BARRAJE EN EL PUNTO DE ACOPLAMIENTO COMUN (PCC).	PORCENTAJE DE DISTORSION ARMONICA INDIVIDUALDE VOLTAJE.	PORCENTAJE DE DISTORSION ARMONICA TOTAL DE VOLTAJE (THD %)
69 kV y menores	3.0	5.0
69001 hasta 161 kV	1.5	2.5
161001 y mayores	1.0	1.5

NORMA IEC. EQUIPOS DE ILUMINACION (CLASE C)

Orden Armónico (n)	Máxima corriente armónica permisible expresada como un porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental (%)
2	2
3	30
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$	3
(únicamente armónicos impares)	

LA BOMBILLA FLUORESCENTE

Las bombillas fluorescentes son de descarga eléctrica y de mercurio a baja presión, en las que un recubrimiento de fósforo transforma en luz parte de la energía ultravioleta generada por la descarga. La bombilla es un pequeño tubo de vidrio controlado por un dispositivo llamado balasto.

TIPOS DE BALASTOS

- Balasto para bombillas de Precalentamiento.
- Balasto para bombillas de Encendido rápido.
- Balasto para bombillas de Encendido Instantáneo (Slimline).
- Balasto electrónico.
- Balasto híbrido.

DESVENTAJAS DE LOS BALASTOS ELECTROMAGNETICOS.

Pérdidas. Existen pérdidas por la presencia de las corrientes de Foucault e Histéresis. Además, existen pérdidas por calentamiento en el conductor, ocasionándose una caída de tensión entre los extremos del balasto.

Parpadeo. Durante el encendido de un sistema con arrancador existe en algunas ocasiones un parpadeo molesto.

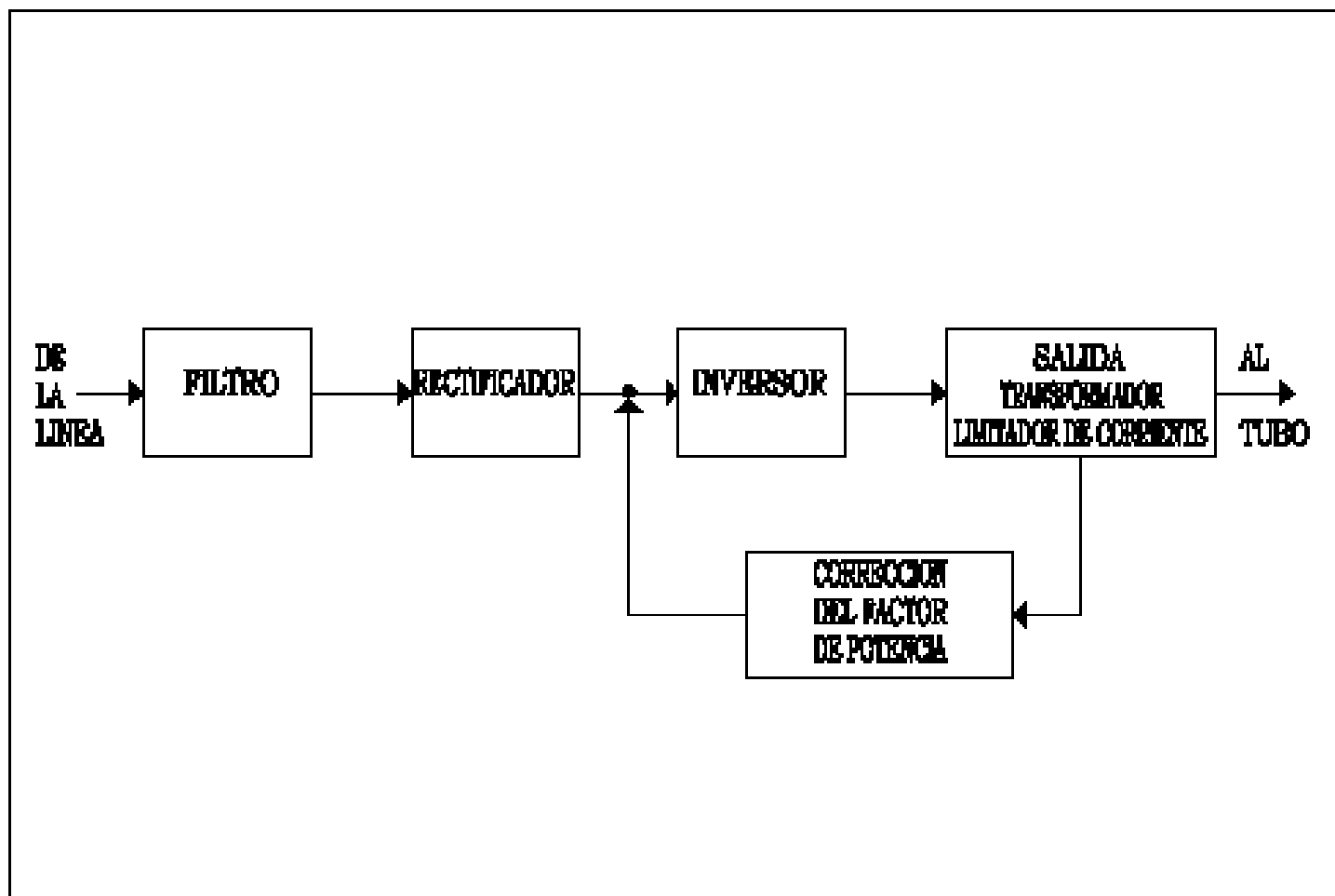
Inestabilidad. Si existen fluctuaciones en la tensión de la red, el balasto simplemente sigue las fluctuaciones de voltaje de la red, causando así los correspondientes altibajos en la iluminación y la potencia consumida por el sistema.

Temperatura. Puesto que mucha de la energía absorbida por el balasto durante la limitación se convierte en calor, la temperatura del balasto durante su operación depende de la calidad del mismo.

Ruido. Es la vibración que producen las láminas de hierro del núcleo por el campo magnético y sus variaciones. Debido a la acción de la corriente alterna en el núcleo de hierro, el balasto produce normalmente un zumbido. La magnitud de éste depende del diseño y calidad del balasto.

EL BALASTO ELETRÓNICO

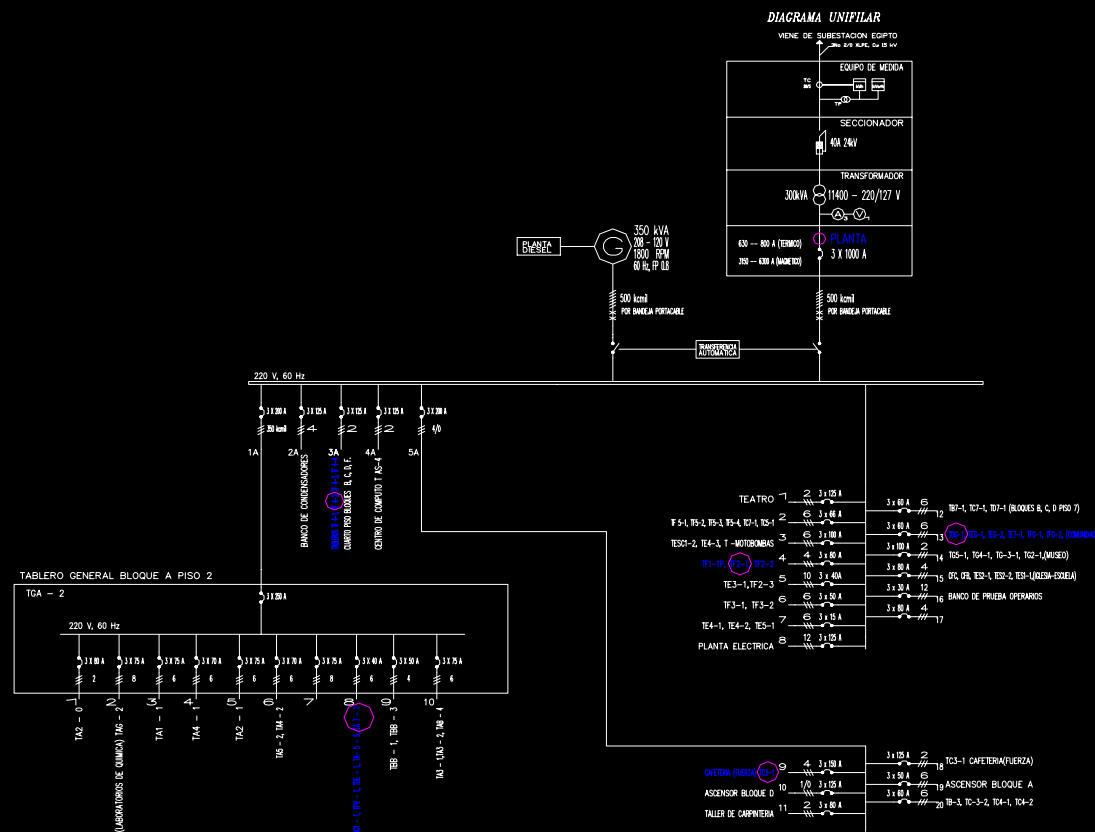
- Filtro. Es el encargado de proteger los componentes internos del balasto de los transientes de la línea.
- Rectificador. El rectificador es el encargado de convertir la tensión de corriente alterna de 60 Hz a una tensión de corriente continua rectificada.
- Inversor. El inversor convierte la onda de tensión de corriente continua rectificada a una tensión de corriente alterna, entre 20 y 60 kHz.
- Limitador de corriente. Provee la tensión necesaria para arrancar la bombilla y también para controlar la corriente de la bombilla.
- Corrección del factor de potencia. La retroalimentación del circuito es la encargada corregir el factor de potencia.



VENTAJAS DEL BALASTO ELECTRÓNICO

- **Ahorro de energía.** Hasta un 75% de ahorro en consumo respecto a las bombillas incandescentes de las mismas características de emisión de luz.
- **Vida útil más larga.** Duran hasta 10.000 horas, diez veces más que las incandescentes.
- **Excelente reproducción cromática.** El tri-fósforo de tierras raras que se utiliza como recubrimiento en el interior del tubo, proporciona una luz parecida a las incandescentes, lo que hace difícil distinguir entre ambas.
- **Tamaño y peso.**
- **Encendido sin parpadeo.**
- **Beneficio del medio ambiente.** Al reducir el consumo de electricidad, disminuye el nivel de contaminación en la atmósfera.

ADQUISICION DE DATOS EN LA UNIVERSIDAD



FORMATO DE VISITAS A TABLEROS

TABLERO	UBICACIÓN	# DE CIRCUITOS	# CTOS. DE ILUMINACION	# DE LUMINARIAS	BALASTO	POTENCIA	OBSERVACIONES
TA 2-0	PISO 2 BL A	12	6	32	MEZCLA DO		OFICINAS
							COMPUTADORES
TA 2-1	PISO 2 BL A	24	7	27	MEZCLA DO		SIN ID
							OFICINAS
							COMPUTADORES
TA 3-1	PISO 3 BL A	24	6	30	MEZCLA DO		SIN ID
							OFICINAS
							COMPUTADORES
TA 5-2	PISO 5 BL A	12	0	NA	NA		
TA 6-1	PISO 6 BL A	12	6	70	MEZCLA DO		OFICINAS
							QUIMICA LAB
TA 4-1	PISO 4 BL A	24	11	66	MEZCLA DO		BAJO LLAVE
TA 1-1	PISO 2 BL A						BAJO LLAVE
TA 7-1	PISO 7 BL A	18	9	50	ELECTRO NICO	8/2x17	AULAS
						30/2x32	CORREDORES
						30/2x59	REFLECTORES

TABLEROS SELECCIONADOS

Los tableros escogidos fueron: TD6-1, TA 7-1, el tablero de la cafetería, TF 4-1, el tablero de la sala de exposición. Este proyecto también contempló medidas en la acometida principal de la Universidad, la cual está situada en el área de la planta eléctrica.



CIRCUTOR AR5

El equipo de medición utilizado para desarrollar el proyecto fue el Analizador de Redes marca Circutor AR5. El analizador es un instrumento de medida programable que registra en su memoria todos los parámetros eléctricos de la red. El analizador está dotado con cuatro canales de tensión, tres de corriente y uno auxiliar que tiene múltiples funciones.

AR.5



ANALISIS DE DATOS REGISTRADOS

En la Universidad de la Salle sede centro están siendo utilizados los dos tipos de balastos, que son los electromagnéticos y los electrónicos para el alumbrado de la gran mayoría de las áreas de la Universidad con bombillas fluorescentes.

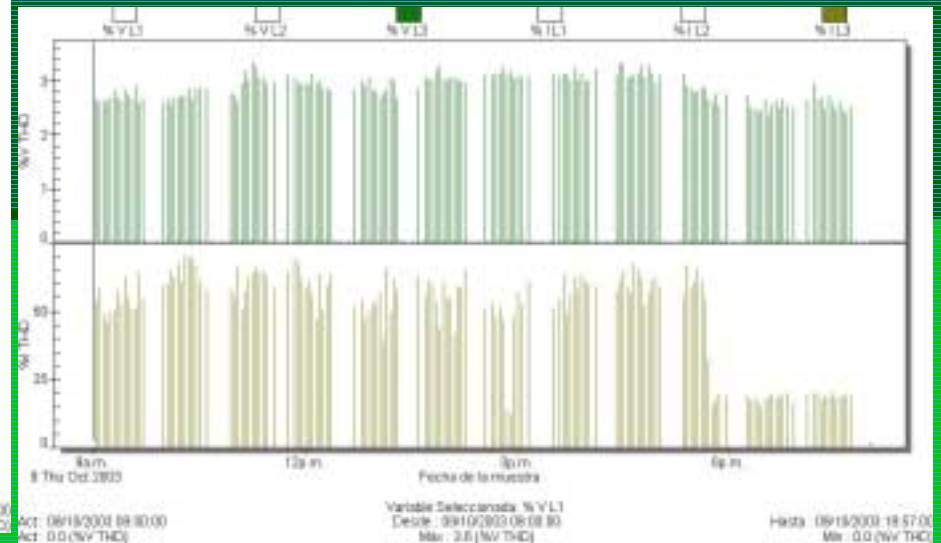
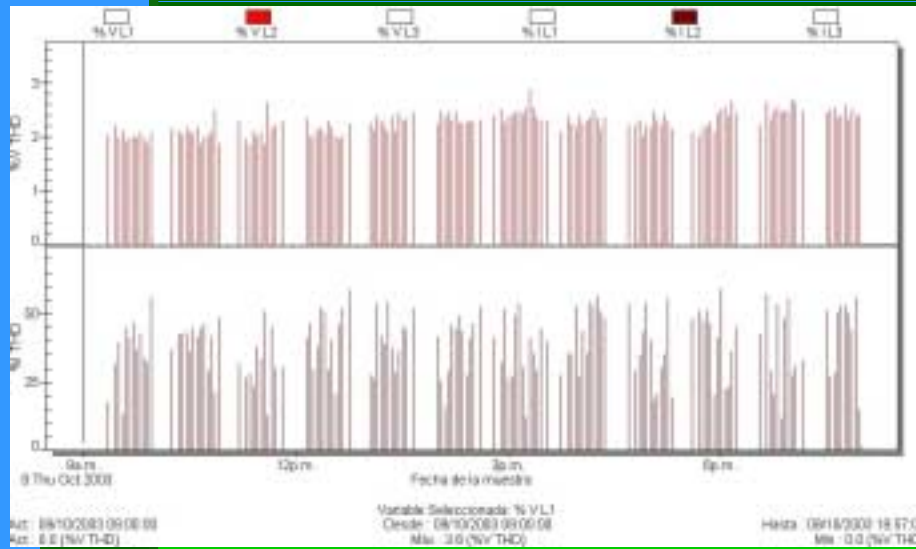
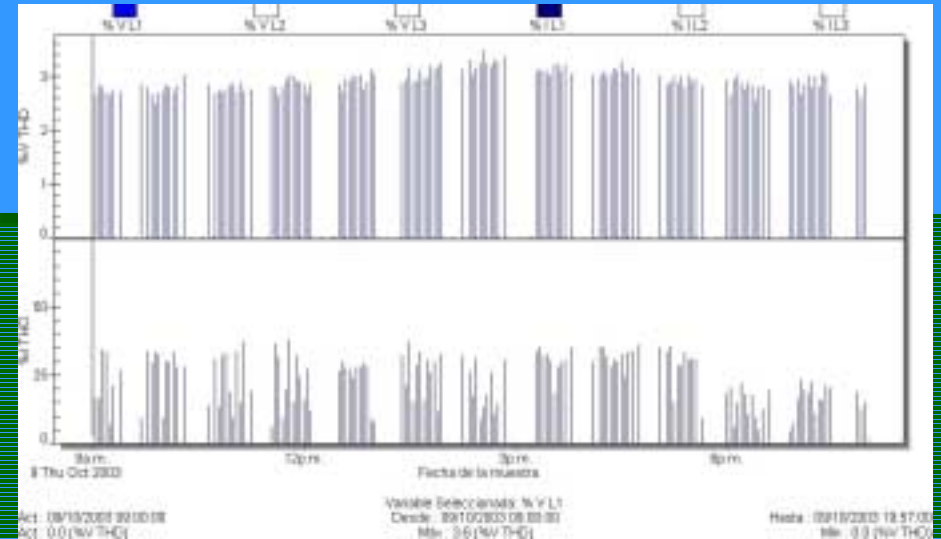
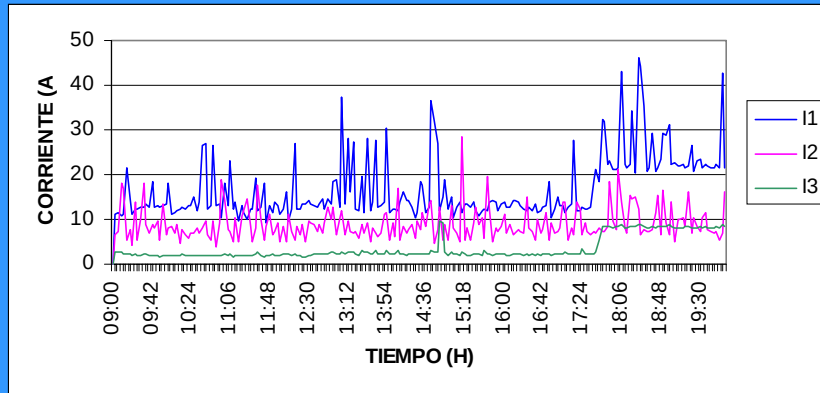
El proyecto como tal busca evaluar la polución generada por los balastos electrónicos pero como se ha visto, la Universidad todavía tiene circuitos donde mezcla balastos electromagnéticos y electrónicos, los cuales también se van a analizar.

TABLERO DE LA CAFETERÍA

Este tablero alimenta 68 luminarias las cuales tienen balastos electrónicos y electromagnéticos mezclados entre los circuitos del tablero, esta compuesto por: 5 de 2x59W, 25 de 2x32W, 15 de 2x17W, 7 de 2x75W, 2 de 2x40W y 14 de 2 x 20W. Este tablero contiene circuitos de iluminación para la cafetería, el corredor que queda en frente de ésta y la entrada de las escaleras del bloque C.



GRÁFICAS



ANÁLISIS DE THD'S DE TENSIÓN Y CORRIENTE POR FASE PARA EL TABLERO DE LA CAFETERÍA

TENSION	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	2,5	1,8	2,3
Promedio	2,9224	2,2721	2,8699
Máximo	3,6	3	3,4
Desv.Estand	0,1975	0,2018	0,2468

CORRIENTE	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Mínimo	4,6	5,9	12
Promedio	24,2836	37,8516	49,4977
Máximo	38,4	59	71,4
Desv.Estand	8,8250	12,4495	17,4772

ANÁLISIS INDIVIDUAL DE CORRIENTE POR FASE DEL TABLERO DE LA CAFETERÍA (FASE 1)

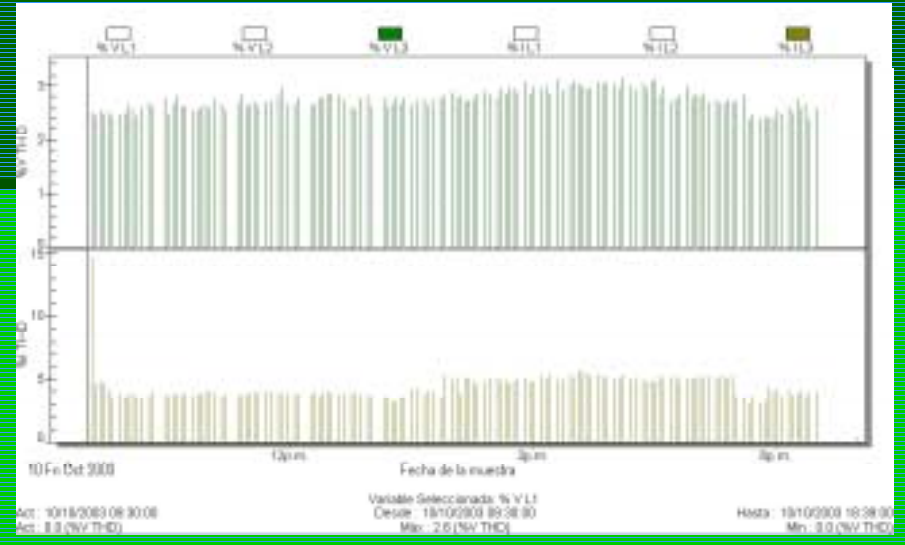
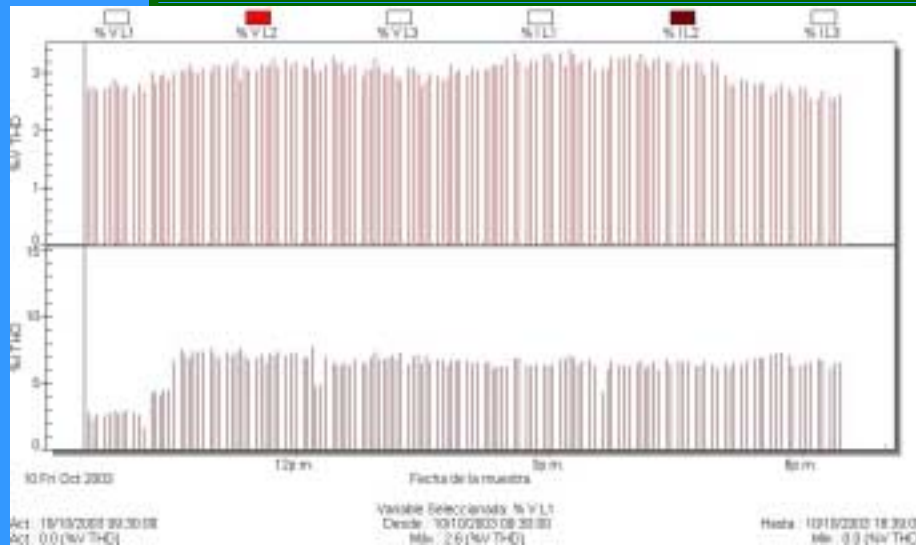
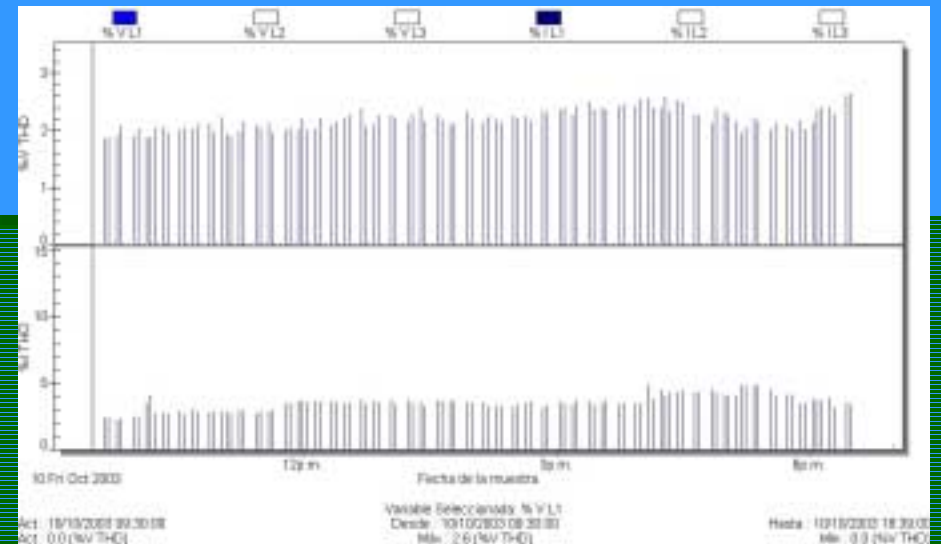
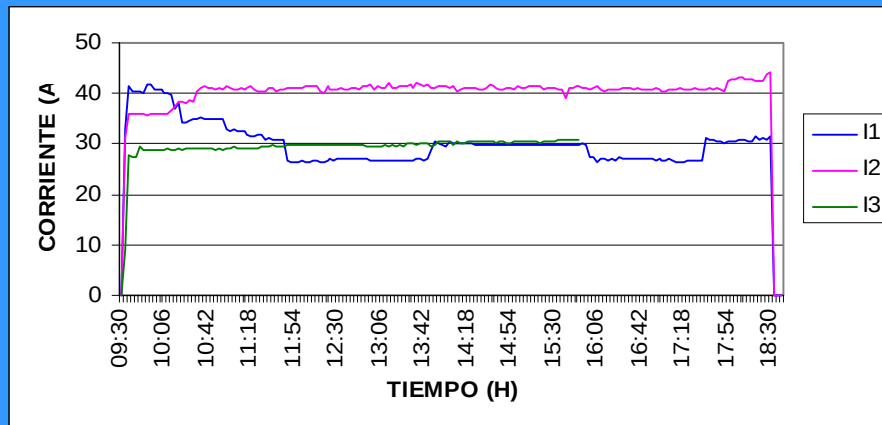
Orden	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv. Estánd.	Límites. I EC	# Dat. Fuera	Ang. I. y IV, %	Ang. II y III, %
2	0,059	0,506	2,795	0,369	2	2	58,64	41,36
3	3,429	19,957	33,147	7,956	30	17	45,91	54,09
5	0,438	11,027	22,463	4,868	10	145	15,45	84,55
7	0,82	6,209	15,673	3,088	7	84	67,27	32,73
9	0,44	3,560	10,865	2,001	5	54	46,82	53,18
11	0,128	3,092	7,611	1,727	3	110	48,64	51,36

TABLERO DE LA SALA DE EXPOSICIÓN

El tablero de la sala de exposición es el encargado de alimentar 55 bombillas fluorescentes de 2 por 17 W, las cuales sólo tiene balastos electrónicos.



GRÁFICAS



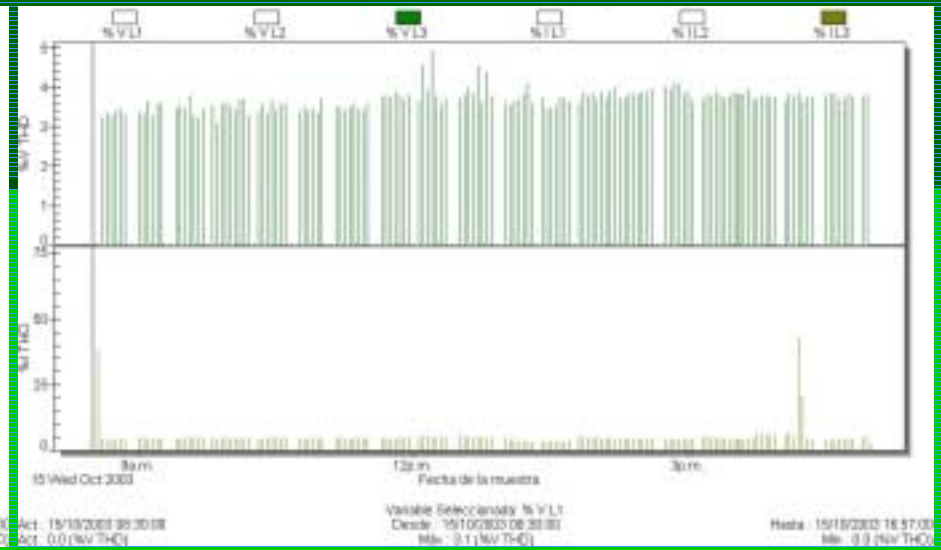
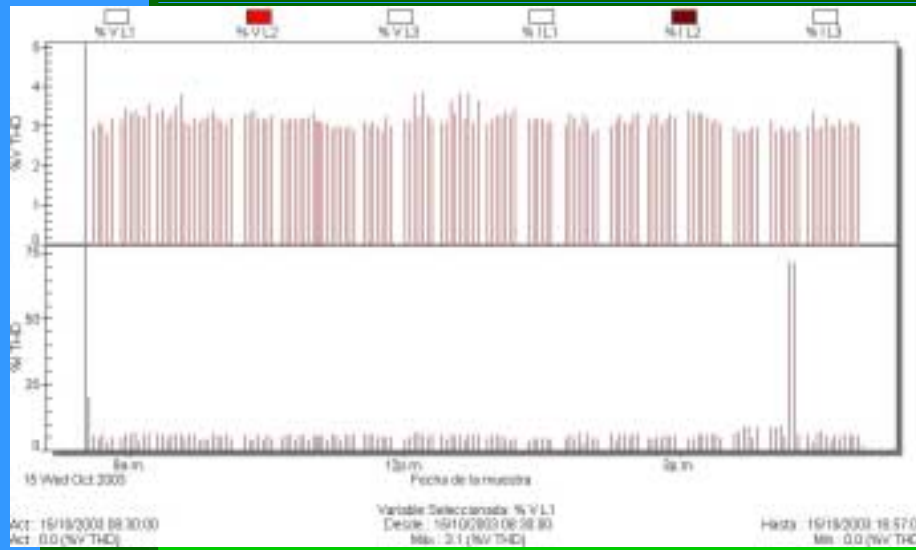
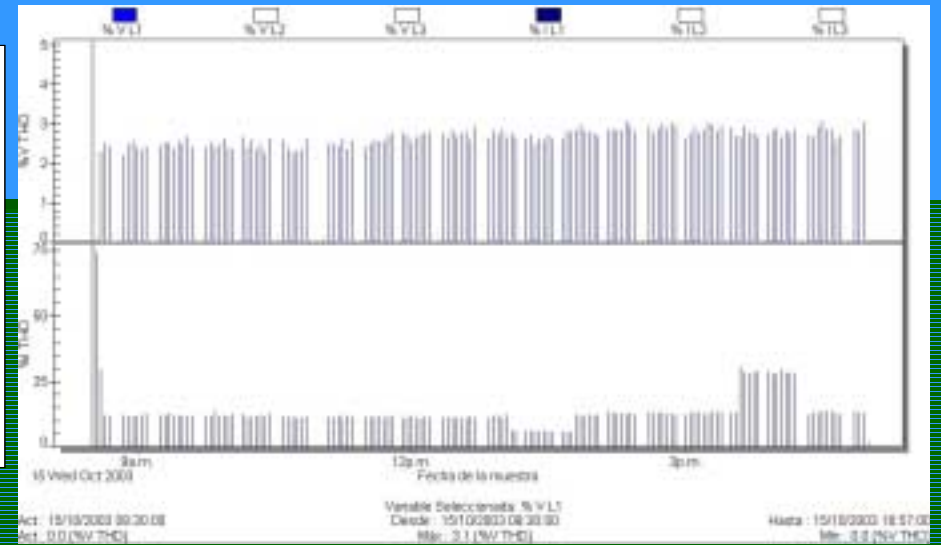
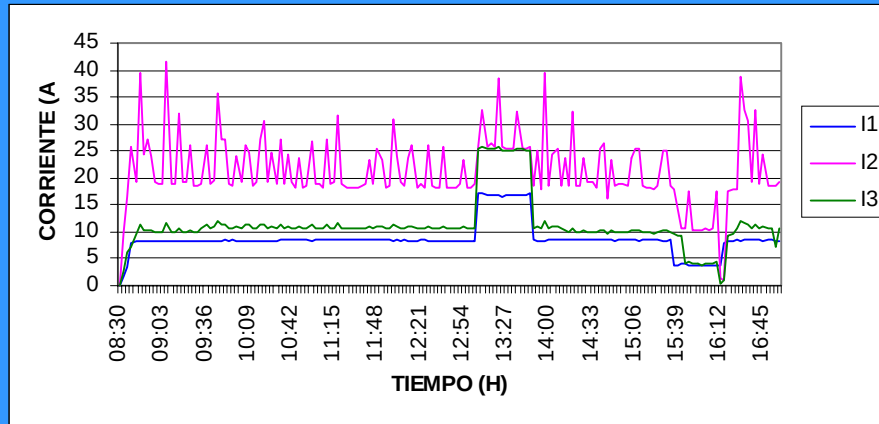
TABLERO TA7

- El tablero alimenta 68 bombillas fluorescentes 8 de 2 por 17 W, 30 de 2 por 32 W y 30 de 2 por 59 W de 96" de largo, las cuales todas utilizan balasto electrónico. Este tablero ilumina las aulas del piso séptimo del bloque A, los corredores y las escaleras debido a también es el encargado de alimentar los reflectores que iluminan el parqueadero las mediciones se realizaron hasta las seis de la tarde, hora en que son encendidos.





GRÁFICAS



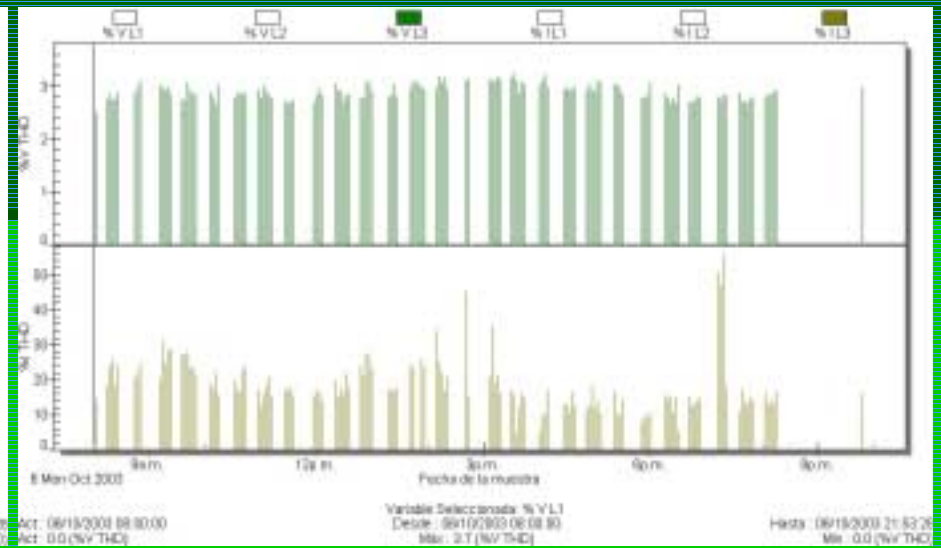
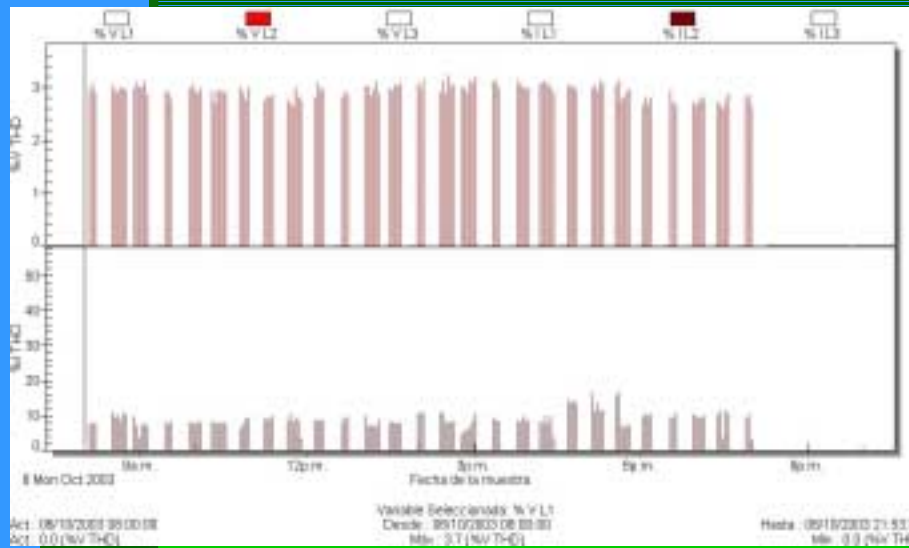
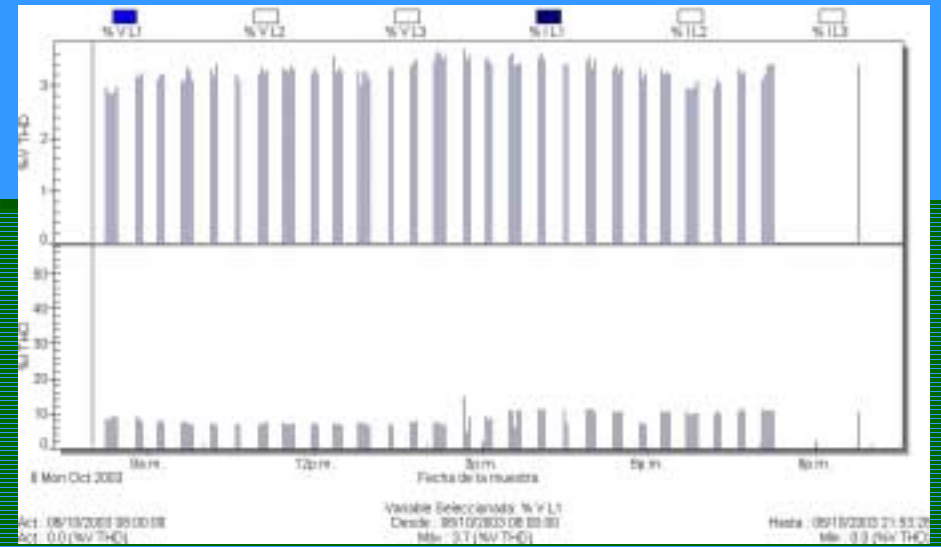
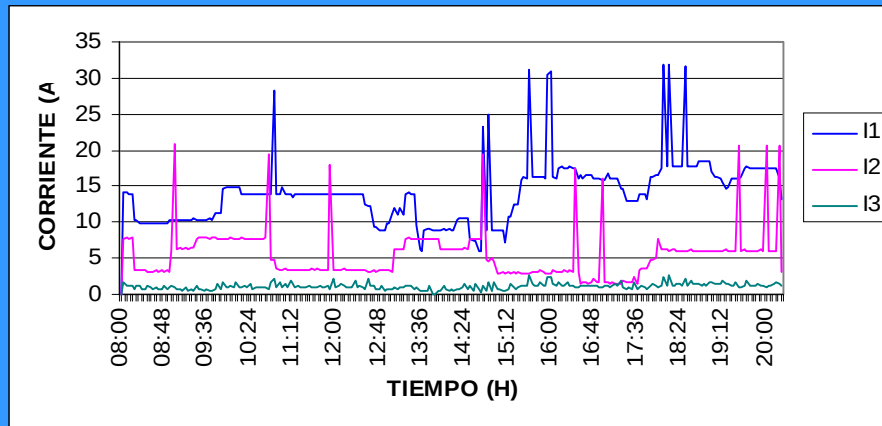
TABLERO TD6

El tablero TD6 queda ubicado en piso sexto del bloque D, es el encargado de alimentar las bombillas fluorescentes de los salones, baños, corredor y escaleras. En total alimenta 52 bombillas fluorescentes que utilizan balasto electrónico: 41 de 2 por 32 W, 2 de 2 por 17 W y 9 de 4 por 17 W.



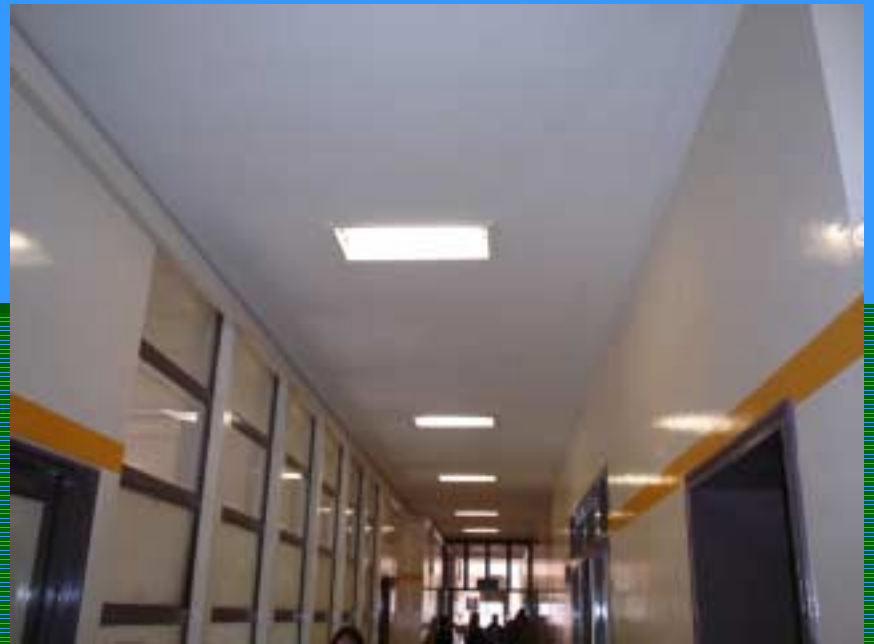


GRÁFICAS

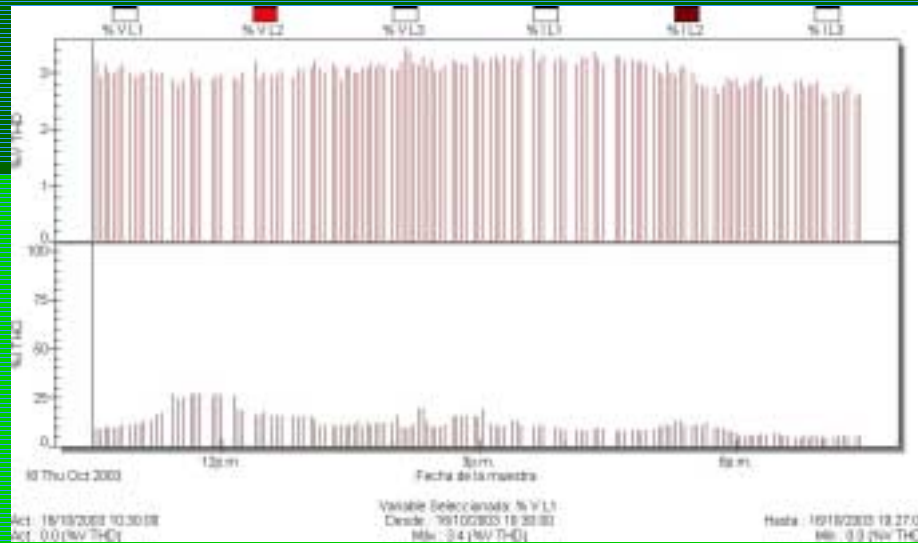
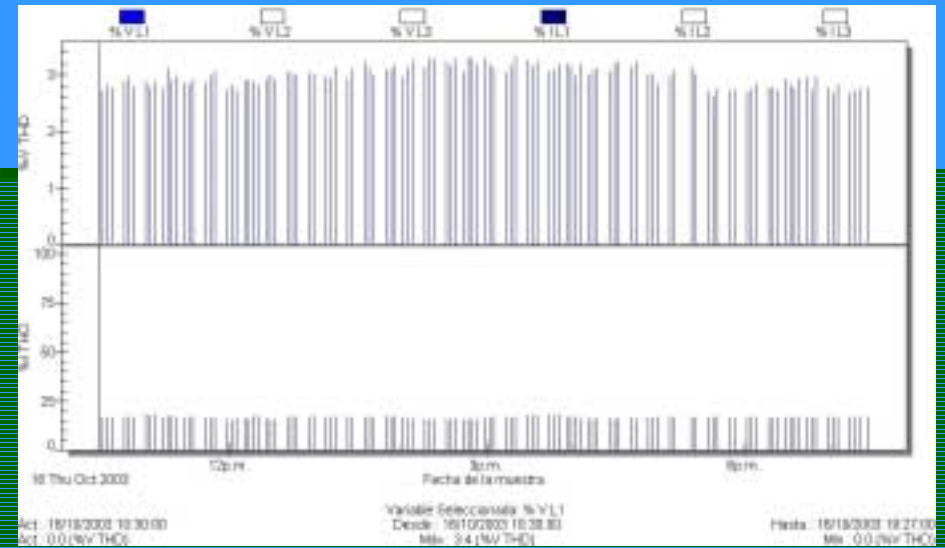
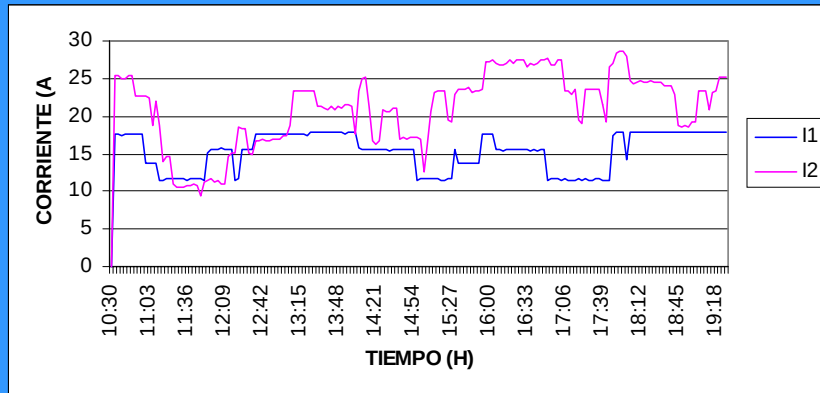


TABLERO TF4

El tablero TF4 está ubicado en el cuarto piso del bloque F donde también está la biblioteca y las salas de lectura individual. Este tablero es el encargado de alimentar la iluminación de los salones del cuarto piso del bloque C, las salas de lectura, el corredor y parte de la iluminación de la biblioteca. En el inventario que se hizo se contaron 94 bombillas fluorescentes, 55 de 2 por 32 W, 10 de 2 por 17 W y las demás son bombillas fluorescentes con balasto electromagnético de 2 por 40W, luego se puede decir que el tablero tiene balastos mezclados.



GRÁFICAS



CUADRO COMPARATIVO DE RESUMEN

TABLERO	BALASTO	Máximos valores de THD para tensión			Máximos valores de THD para corriente		
		FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 1	FASE 2	FASE 3
CAFETERIA	MEZCLADO	3,6	3	3,4	38,4	59	71,4
SALA DE EXPOSICION	ELECTRONICO	2,6	3,4	3,1	4,9	7,7	14,6
TABLERO TA7	ELECTRONICO	3,1	3,8	4,9	74,3	71,7	43,1
TABLERO TD6	ELECTRONICO	3,7	3,3	3,2	14,9	19	55,5
TABLERO TF4	MEZCLADO	3,4	3,4	0	18,4	33	0

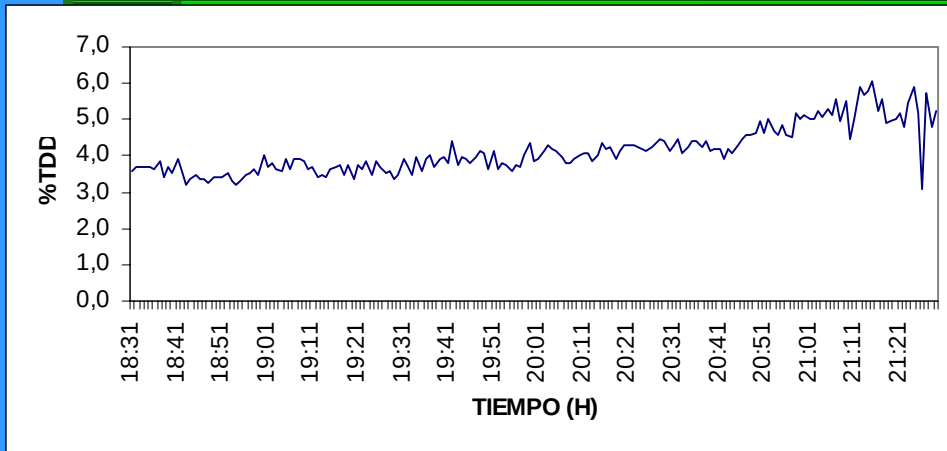
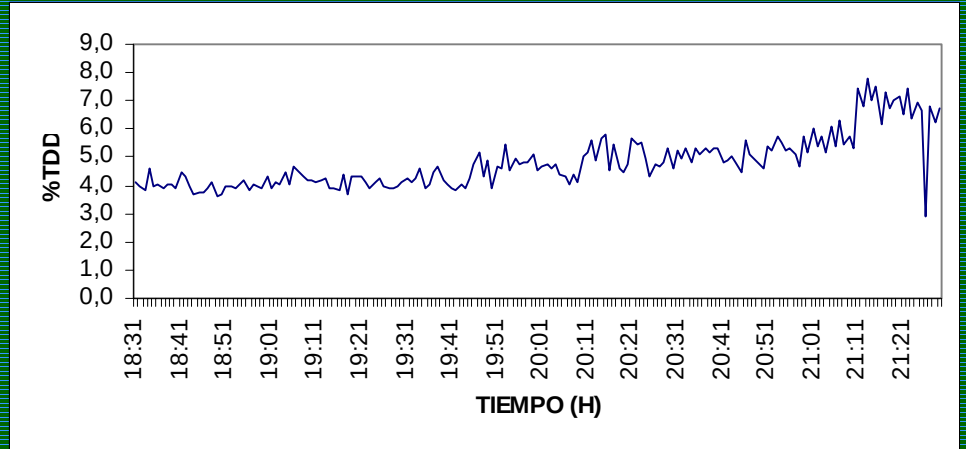
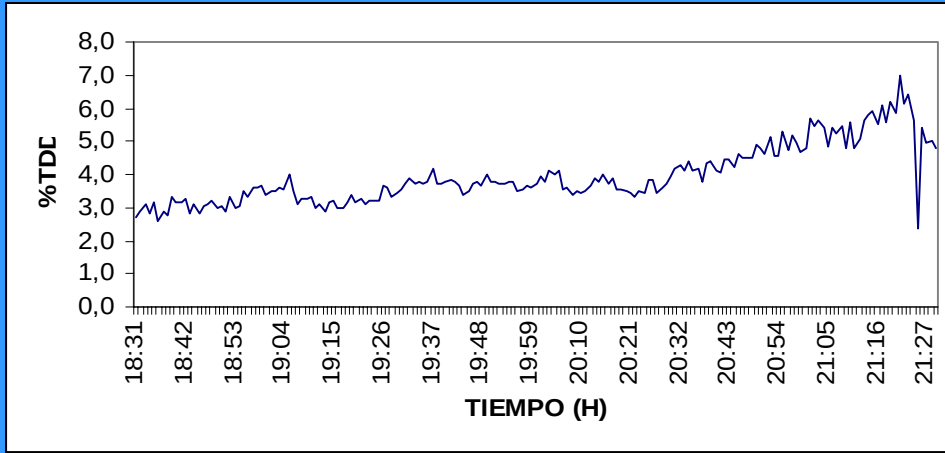
Armónicos que sobrepasan los límites IEC			% de Armónicos que salen hacia la red		
FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 1	FASE 2	FASE 3
2, 3, 5, 7, 9 y 11	2, 3, 5, 7, 9 y 11	2, 3, 5, 7, 9 y 11	2, 54%; 5, 85%; 9, 53%; 11, 51%	5, 81% y 11, 58%	2, 52%; 3, 73%; 9, 72%
NINGUNO	NINGUNO	NINGUNO	2, 57%; 7, 92%; 9, 53%	2, 54%; 3, 92%; 7, 93%	2, 54%; 3, 64%; 7, 69%
2, 3, 5, 7, 9 y 11	2, 3, 5, 7, 9 y 11	2, 3, 5, 7, 9 y 11	3, 100%; 7, 91%; 11, 72%	5, 83%; 7, 99%; 11, 98%	2, 51%; 5, 98%
NINGUNO	2 y 11	2, 3, 5, 7, 9, 11	7, 100%; 9, 96%	5, 100%; 7, 99%; 9, 88%; 11, 51%	2, 54%; 3, 60%; 9, 63%; 11, 53%
NINGUNO	2, 5, 7 y 11	0	5, 96%; 7, 100%	3, 94%; 7, 100%; 9, 100%	N/A

% de Datos Fuera de los Límites		
FASE 1	FASE 2	FASE 3
2, 0,9%; 3, 8%; 5, 66%; 7, 38%; 9, 25%; 11, 50%	2, 5%; 3, 56%; 5, 84%; 7, 81%; 9, 75%; 11, 80%	2, 30%; 3, 77%; 5, 96%; 7, 89%; 9, 79%; 11, 85%
NINGUNO	NINGUNO	NINGUNO
2, 0,6%; 3, 0,6%; 5, 9%; 7, 9%; 9, 9%; 11, 1%	2, 2%; 3, 1%; 5, 1%; 7, 1%; 9, 1%; 11, 1%	2, 0,6%; 3, 0,6%; 5, 0,6%; 7, 0,6%; 9, 0,6%; 11, 0,6%
NINGUNO	2, 9,8%; 11, 0,4%	2, 68%; 3, 3,3%; 5, 7,8%; 7, 9,4%; 9, 15%; 11, 30%
NINGUNO	2, 3%; 3, 0%; 5, 20%; 7, 7%; 9, 0%; 11, 9%	N/A

ACOMETIDA PRINCIPAL

La última medición se realizó en la acometida principal de la Universidad. Lo anterior con el fin de medir el consumo general de la iluminación fluorescente en la Universidad debido a en este periodo de tiempo se presenta el mayor consumo de la misma, pues la mayoría de las bombillas están encendidas y las cargas de computadores no se presentan ya que las oficinas están cerradas y los otros tipos de iluminación como los reflectores de los parqueaderos son muy contados en comparación con la iluminación fluorescente. La medición se efectuó de 6:30 PM a 9:30 PM.

Debido a que la concentración de carga en los tableros era mucho más pequeña comparada con la que se tiene en la acometida principal de la Universidad, aquí se utiliza la norma **IEEE - 519** vista en el primer capítulo en la tabla 2, en esta tabla se puede apreciar que para poder comparar las mediciones obtenidas con ella es necesario conocer la relación ICC/IC . La corriente de corto circuito se obtuvo de los datos de placa del transformador de la Universidad y tiene un valor de 26,71 kA, con este dato y la máxima corriente de carga que es 585 A se obtiene el valor de la relación la cual da 45,65 para luego referirnos a la tabla 2 del primer capítulo y encontrar los límites de distorsión armónica.



CONCLUSIONES

- En todos los tableros, como se puede apreciar, los porcentajes de distorsión armónicos de tensión cumplen con la norma de la IEEE 519-92 ya que ninguna de las mediciones sobrepasa el 5% especificado por ésta norma.
- En el tablero de la cafetería todos los límites propuestos por la norma IEC no se cumplen ya que en todas las tres fases los valores máximos sobrepasan estos límites así como también algunos promedios de la primera fase y la mayoría de la segunda y tercera fase, esto debido a la mezcla de balastos en los circuitos y al desbalance presentado en las fases.
- Como se puede ver solamente uno de los cinco tableros cumplió a cabalidad con la norma, los cuatro restantes presentaron niveles que sobrepasan los algunos límites.
- Se puede concluir que la combinación de balastos electrónicos con los electromagnéticos aumentan los niveles de los armónicos y que tableros con solo balastos electrónicos como el de la sala de exposición y el TD6 cumplen satisfactoriamente con la norma.

- Una comparación entre el tablero de la cafetería y el TF4 muestra hay mayor contaminación por parte del tablero de la cafetería, el cual tiene conectados el 34% de balastos electromagnéticos frente al 12 % del tablero TF4, por lo que se puede concluir que a mayor número de balastos electromagnéticos mayor es la contaminación presentada.
- El tablero de la cafetería y el TA7 violan todos los límites propuestos por la norma IEC en los armónicos 2, 3, 5, 7, 9 y 11 para todas las tres fases.
- El único tablero que cumple con la norma IEC en todas sus tres fases es el de la sala de exposición, así como las primeras fases de los tableros TD6 y TF4.
- Los armónicos que más contaminación aportan saliendo hacia a la red son: el armónico 7 en la primera fase de los tableros de la sala de exposición, TA7, TD6 y TF4. Para la segunda fase predominan los armónicos 5 y 7 que salen hacia la red en cuatro de los cinco tableros y para la tercera fase el armónico que más predomina es el 2.
- En el tablero de la cafetería se observa que el 5 armónico contribuye con el 84.55% de 145 datos fuera del límite que sale hacia la red para la primera fase, mientras que para la segunda, el mismo armónico contribuye con el 81.36% de 184 datos fuera de los límites que igualmente sale hacia la red.

- Como se puede observar en las mediciones hechas en todos los tableros, la variación de la tensión cumple con las normas establecidas de regulación del 10 % (mencionada en el artículo 12 la bibliografía de este proyecto) manteniéndose dentro de este rango.
- Las gráficas del factor de potencia y de la frecuencia muestran un comportamiento normal ya que en la mayoría de los casos cumplen con la norma (CREG 070/98 factor de potencia de 0.9 y de 60 ± 0.2 Hz). El tablero de la cafetería presenta el más bajo factor de potencia llegando a un valor de 0.81.
- En general la problemática ocasionada en las instalaciones de la Universidad por la iluminación con bombillas fluorescentes no es crítica ya que no se encuentran problemas severos que afecten a los demás equipos y la mayor parte de las veces se encontró que se cumple con las normas mencionadas.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda acelerar el cambio de las bombillas y los balastos que iluminan la cafetería ya que es el tablero que mayor contaminación presenta para la instalación.
- Para todos los tableros menos para el de la sala de exposición se recomienda hacer un balance de carga ya que en el tablero de la cafetería la fase tres se encuentra subutilizada, en el tablero TA7 la mayoría de la carga está soportada en la segunda fase, y en el tablero TD6 al igual que el tablero de la cafetería la tercera fase no se utiliza.
- Para el tablero TF4 se recomienda hacerle un cambio total ya que es demasiado viejo y sus conductores tienen el aislamiento en nylon y ya se están deshilachando, lo cual podría ocasionar un corto o un incendio. También las protecciones son muy obsoletas y podrían en un determinado momento no operar.
- Se recomienda hacer un nuevo levantamiento de planos para la Universidad ya que muy pocos circuitos corresponden a los que están plasmados en los planos debido a los continuos cambios que ha sufrido la Universidad a través del tiempo.
- Sería importante seguir con la política de cambiar las bombillas fluorescentes con balasto electromagnético a electrónico pero de manera ordenada por circuitos y no cambiando la bombilla que se encuentra dañada ya que éstas bombillas presentan grandes beneficios como el ahorro de energía, vida útil más larga, excelente reproducción cromática y menor daño al medio ambiente.